



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2009

Carlos Miguel Dias

**Estudo comparativo de diferentes materiais para a
construção de torres élicas**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2009

Carlos Miguel Dias

Estudo comparativo de diferentes materiais para a construção de torres élicas

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor Nuno Manuel Fernandes Alves, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

o júri

Presidente

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís Alberto Gonçalves de Sousa
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior técnico

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia,
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Nuno Manuel Fernandes Alves,
Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Agradecimentos

Em primeiro lugar, começo por agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Nuno Alves e Professora Doutora Mónica Oliveira por tudo o apoio prestado e incentivo.

Agradeço ao meu amigo Rui Ruben por todo o apoio prestado durante este trabalho.

Agradeço ao meu colega de gabinete e grande amigo por todo o apoio prestado e incentivos mesmo nos momentos mais difíceis.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, e, em particular ao Departamento de Engenharia Mecânica, agradeço as condições disponibilizadas.

À minha família por me ter dado oportunidade de estudar e pelo apoio sempre prestado mesmo nos momentos mais difíceis.

Finalmente, a todos e a cada um, que contribuíram directamente ou indirectamente na concretização deste trabalho, a minha gratidão e reconhecimento.

A todos, muito obrigado.

Palavras-chave

Energia eólica, estruturas, simulação computacional, optimização, elementos finitos, materiais

Resumo

Para a produção de energia eléctrica através de um recurso natural como o vento, são actualmente utilizados vários tipos de estruturas de torres eólicas, fundamentalmente estruturas construídas em aço tubular, treliça ou betão. As estruturas em aço tubular estão limitadas em termos dos valores máximos do seu diâmetro da base e da sua altura. Por outro lado, a construção de estruturas em treliça tem elevados custos de montagem e manutenção. Os problemas de corrosão são comuns a este tipo de estruturas, podendo também surgir por vezes nas estruturas de betão tradicional.

Os modelos computacionais correntes permitem apenas simular o comportamento mecânico de estruturas de torres eólicas formadas por um único material, estando fundamentalmente desenvolvidos para estruturas em aço ou betão.

Através deste trabalho de investigação desenvolveu-se uma metodologia baseada no método dos elementos finitos, permitindo estudar o comportamento mecânico de estruturas de torres eólicas em termos estáticos e dinâmicos e aplicar vários tipos de materiais em simultâneo. A inclusão do elemento finito sólido apropriado para modelar o comportamento de flanges, combinado com um elemento casca, permitiu obter respostas mecânicas das estruturas mais próximas dos seus comportamentos reais, possibilitando assim proceder a uma optimização mais efectiva por via da redução de espessuras.

A metodologia foi aplicada a sete casos de estudo, com o objectivo de obter estruturas de torres eólicas que apresentem uma melhor resposta mecânica em termos estáticos e dinâmicos e também uma optimização em termos dos seus pesos próprios efectuadas pela combinação de diferentes materiais e redução de espessuras.

Keywords

Wind energy, wind towers, computer simulation, optimisation , finite elements, materials

Abstract

Several kinds of wind towers are used to produce electrical energy from the wind. These towers are manufactured using tubular steel, truss or concrete. Parameters like maximum diameter and height are some limitations of tubular steel towers. On the other side, truss towers have disadvantages in terms of assembly and maintenance costs. Moreover, these towers frequently present corrosion problems, which can also arise in concrete towers.

Current computer models are able to simulate mechanical behaviour of single material towers obtained with steel or concrete material.

Throughout this research, a new methodology was developed based on finite element method, allowing to study static and dynamic mechanical behaviour of wind towers through the combination of different materials. The finite element model encompasses an appropriated solid element to model the flange behaviour which is combined with a shell element, allowing to obtain an improved mechanical feedback of towers. This approach allows us to obtain a more effective optimisation regarding the thickness of towers .

Seven cases studies were performed in order to obtain towers with improved static and dynamic mechanical behaviour. The mass optimisation was also performed through the combination of different material reducing the thickness of towers.

Índice

1.	Introdução	1
2.	Objectivos.....	5
3.	Estrutura da tese	7
4.	Estado da arte.....	9
4.1	Caracterização dos factores que condicionam o aproveitamento do vento	9
4.2	Estruturas de torres eólicas.....	11
4.3	Betão polimérico	15
5.	Metodologia desenvolvida para projecto de estruturas de torres eólicas	19
5.1	Cálculo da velocidade do vento.....	22
5.2	Solicitações exercidas sobre a estrutura de uma torre eólica	22
5.3	Rotina de pré-processamento.....	24
5.4	Programa de análise de elementos finitos.....	28
5.4.1	Análise de convergência.....	29
5.5	Análise de estabilidade.....	31
5.6	Análise dinâmica.....	31
5.7	Validação da metodologia.....	32
6.	Aplicações da metodologia de optimização.....	33
6.1	Materiais usados na composição das estruturas	33
6.2	Solicitações.....	35
6.3	Resultados	36
6.3.1	Análise estática	36
6.3.2	Análise dinâmica	46
7.	Conclusões e trabalhos futuros.....	50
7.1	Resumo e conclusões	50
7.2	Trabalhos futuros	52
	Bibliografia.....	54

Índice de figuras

Figura 1 – Capacidade instalada de energia eólica mundial até 2007 [2].	1
Figura 2 - Capacidade instalada de energia eólica. Capacidade instalada até 2006 (a) e capacidade instalada durante o ano 2007 (b) [1].	2
Figura 3 – Duração de uma campanha experimental vs precisão nas estimativas [10].	10
Figura 4 - escoamento em torno de um edifício [11].	11
Figura 5 – Configuração da estrutura (a), modelo dos elementos finitos (b) [5].	13
Figura 6 – Fluxograma da metodologia.	21
Figura 7 - Diagrama das solicitações. Forças exercidas pelo vento directamente sobre a estrutura da torre (a) [6]. Forças e momentos exercidos pelo gerador sobre a estrutura da torre (b) [6].	22
Figura 8 – Fluxograma com metodologia para cálculo estrutural.	26
Figura 9 – Fluxograma com metodologia para cálculo de frequências e modos de vibração.	27
Figura 10 – Geometria do elemento finito casca usado para representar a estrutura de uma torre eólica [19].	28
Figura 11 – Geometria do elemento finito sólido usado para representar as flanges [19].	29
Figura 12 - Geometria representativa da união da flange com a torre (a). Interface dos elementos finitos casca-sólido (b).	29
Figura 13 - Análise de convergência.	30
Figura 14 – Malha com 3621 elementos (a). Malha com 6749 elementos (b). Malha com 8673 elementos (c).	30
Figura 15 - Modelo de elementos finitos para análise dinâmica. Adaptado de [5].	31
Figura 16 - Distribuição de tensões de Von-Mises (a). Primeiro modo de vibração (b). Segundo modo de vibração (c).	32
Figura 17 – Estruturas de torres eólicas estudadas. Estrutura em aço st 37 ($h_1+h_2+h_3$) (a). Estrutura em betão ($h_1+h_2+h_3$) ou betão polimérico ($h_1+h_2+h_3$) (b). Estrutura híbrida: betão (h_1+h_2) / betão polimérico (h_3) (c). Estrutura híbrida: betão (h_1+h_2) / aço (h_3), betão polimérico (h_1+h_2) / aço (h_3) ou betão (h_1) / betão polimérico (h_2) / aço (h_3) (d).	34
Figura 18 – Curva tensão vs extensão do aço.	34
Figura 19 – Curva tensão vs extensão do betão [21].	35
Figura 20 – Curva tensão vs extensão do betão polimérico [7].	35
Figura 21 – Estruturas de torres eólicas estudadas. Estrutura em aço st 37 ($h_1+h_2+h_3$) (a). Estrutura em betão ($h_1+h_2+h_3$) ou betão polimérico ($h_1+h_2+h_3$) (b). Estrutura híbrida: betão (h_1+h_2) / betão polimérico (h_3) (c). Estrutura híbrida: betão (h_1+h_2) / aço (h_3), betão polimérico (h_1+h_2) / aço (h_3) ou betão (h_1) / betão polimérico (h_2) / aço (h_3) (d).	36
Figura 22 – Estrutura da torre 1. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).	37
Figura 23 – Estrutura da torre 2. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).	37
Figura 24 – Estrutura da torre 3. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).	38
Figura 25 – Estrutura da torre 4. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).	38

Figura 26 – Estrutura da torre 5. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).	39
Figura 27 – Estrutura da torre 6. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).	39
Figura 28 – Estrutura da torre 7. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).	40
Figura 29 – Tensão de Von-Mises em função da altura para a estrutura em aço st 37.	42
Figura 30 – Tensão máxima de Von-Mises em função da altura para a estrutura em aço st 37.	42
Figura 31 – Pormenor da tensão de Von-Mises em função da altura para a estrutura em aço st 37, no encastramento.	43
Figura 32 – Pormenor da tensão de Von-Mises em função da altura para a estrutura em aço st 37, na zona de redução de espessura.	43
Figura 33 – Tensão de Von-Mises em função da altura para a estrutura híbrida betão/betão polimérico/aço.	44
Figura 34 - Tensão de Von-Mises em função da altura para os sete casos de estudo	45
Figura 35 – Pormenor das curvas de tensão de Von-Mises em função da altura e respectivos coeficientes de segurança para os sete casos de estudo.....	45
Figura 36 – Estrutura da torre 1. Modos de vibração e sua amplitude.....	47
Figura 37 – Estrutura da torre 2. Modos de vibração e sua amplitude.....	47
Figura 38 – Estrutura da torre 3. Modos de vibração e sua amplitude.....	48
Figura 39 – Estrutura da torre 4. Modos de vibração e sua amplitude.....	48
Figura 40 – Estrutura da torre 5. Modos de vibração e sua amplitude.....	48
Figura 41 – Estrutura da torre 6. Modos de vibração e sua amplitude.....	49
Figura 42 – Estrutura da torre 7. Modos de vibração e sua amplitude.....	49

Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades típicas do betão, aço e fibras.	16
Tabela 2 – Propriedades das resinas utilizadas nos compósitos.....	17
Tabela 3 – Resultados da análise de convergência	30
Tabela 4 Comparação de resultados obtidos pelos dois métodos.....	32
Tabela 5 Varias estruturas formadas por diferentes materiais.....	33
Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos materiais estudados.....	34
Tabela 7 – Valores das solicitações para as diferentes torres.....	36
Tabela 8 - Valores de variáveis de projecto para as diferentes estruturas estudadas	40
Tabela 9 – Cálculo da carga crítica para cada estrutura	46
Tabela 10 – Frequências de vibração.....	49

Lista de siglas

V – Velocidade do vento;

V_{ref} – Velocidade do vento de referência;

h – Altura;

h_{ref} – Altura de referência;

α – Coeficiente de rugosidade;

F_w – Força que o vento exerce sobre a estrutura;

q_{ref} – Área efectiva;

ρ_0 – Densidade do ar;

A_{ref} – Área da secção onde a força é exercida;

c_e – Factor de altitude;

I_v – Intensidade da turbulência;

k_r – Factor de terreno;

c_r – Factor de rugosidade;

c_t – Factor de orografia;

z – Altura;

z_0 – Altura de referência;

c_d – Factor dinâmico;

c_f – Factor de força;

ψ_0 – Factor de redução para o coeficiente de força;

Re – Número de Reynolds;

D – Diâmetro médio;

k – Rugosidade do material;

L – Altura;

P_{critico} – Carga critica;

E - Modulo de elasticidade

I – Segundo momento de área;

C_s – Coeficiente de segurança;

σ_y - Tensão de cedência;

σ_{eq} – Tensão equivalente de Von-Mises.

1. Introdução

Actualmente existe uma grande necessidade de se encontrarem formas sustentáveis de produção de energia, não só pelas constantes variações dos preços dos combustíveis fósseis como também numa tentativa de diminuir a emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera. Neste contexto, tem-se vindo a verificar um maior investimento nas energias renováveis, sendo a energia eólica o sector com crescimento mais acentuado.

Segundo Zervos *et al* [1], a indústria eólica mundial instalada em 2007 situou-se próximo de 20 mil MW. Este desenvolvimento, liderado pelos Estados Unidos, Espanha e China, assumiu o total mundial de 93.864 MW, representando um aumento de 31% em comparação com o mercado de 2006 e traduzindo-se num aumento da capacidade instalada global de cerca de 27%. O gráfico da figura 1 representa o crescimento da indústria eólica mundial de 1996 a 2007.

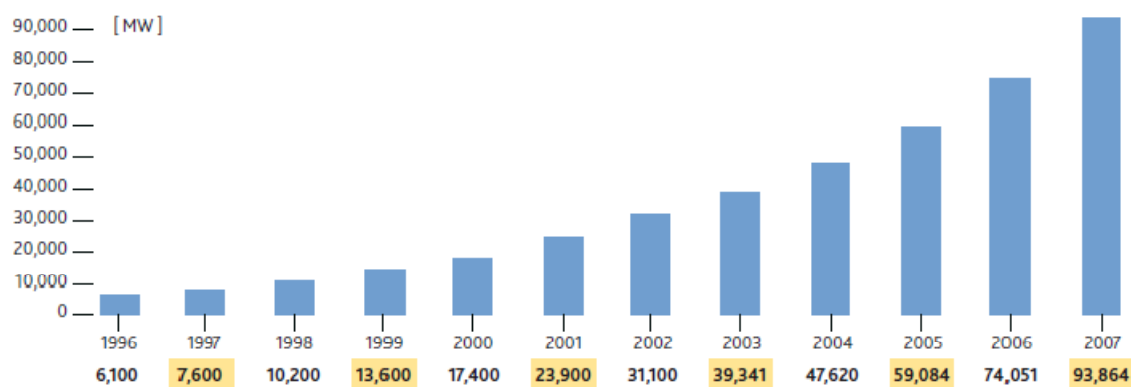


Figura 1 – Capacidade instalada de energia eólica mundial até 2007 [2].

De acordo com Zervos *et al* [2], apesar da Europa continuar a ser o principal mercado para a energia eólica, as novas instalações representam apenas 43% do total global, percentagem bastante abaixo dos quase 75% em 2004. Pela primeira vez, em décadas, mais de 50% do mercado eólico anual foi fora da Europa, e esta tendência deverá manter-se no futuro.

Enquanto a Europa, América do Norte e Ásia continuam a aumentar significativamente a sua capacidade de energia eólica, o Médio Oriente e o Norte de África também aumentaram a sua capacidade em 42%, atingindo 538 MW no final de 2007 [1].

Por outro lado, o crescimento na região do Pacífico foi conduzido pela Nova Zelândia com 151 MW em nova capacidade instalada, que praticamente dobrou a sua produção, atingindo 322 MW. Contrariamente a este crescimento, a Austrália teve um ano excepcionalmente fraco, com apenas 7 MW resultantes de novas instalações. Entretanto, a Austrália assinou a ratificação do Protocolo de Quioto e traçou como objectivo que até 2020 cerca de 20% do total da sua energia será produzido a partir de energias renováveis [1].

A figura 2 apresenta os dez países com maior capacidade instalada até 2006, assim como a capacidade instalada apenas durante o ano de 2007.

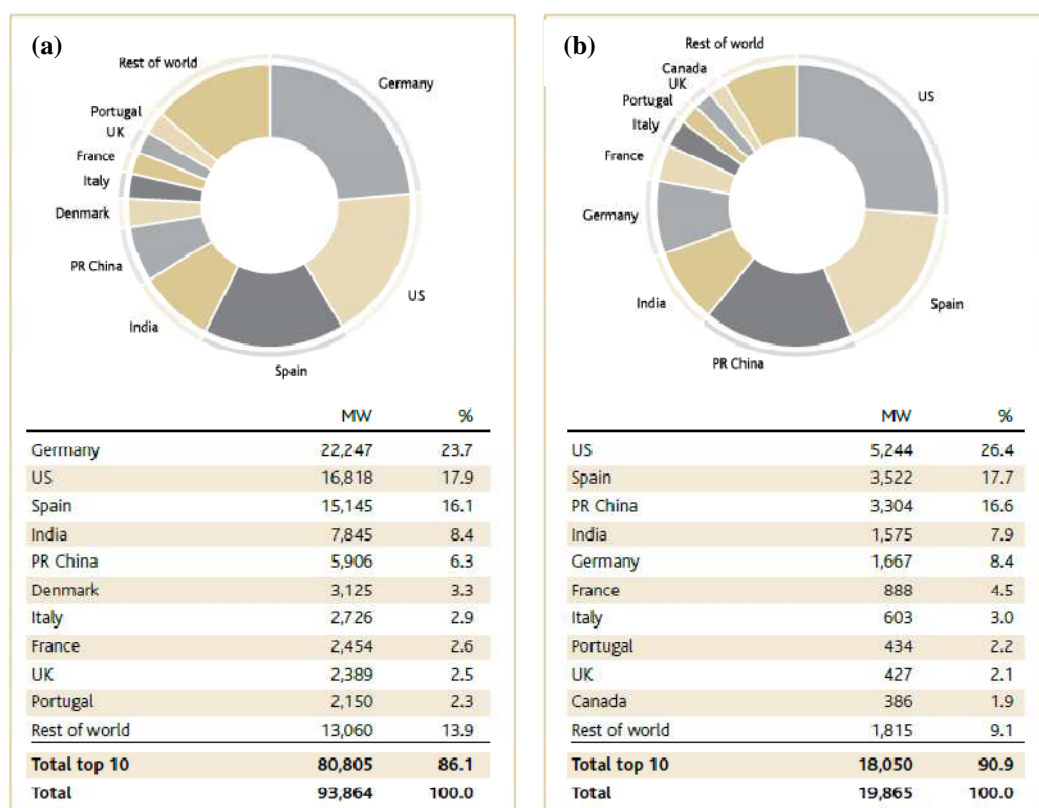


Figura 2 - Capacidade instada de energia eólica. Capacidade instalada até 2006 (a) e capacidade instalada durante o ano 2007 (b) [1].

De acordo com o descrito em [1], o ano de 2007 foi crucial para a política das energias renováveis nos 27 estados membros da União Europeia. Estes concordaram que até 2020, 20% da energia eléctrica consumida teria de ser proveniente de fontes de energia renováveis. Em Janeiro de 2008 a comissão Europeia elaborou legislação para as energias renováveis, propondo um quadro estável e flexível para a expansão da produção de energia eléctrica por geradores eólicos. Para que esta meta seja cumprida a Europa tem que aumentar o consumo diário de cerca de 15% para 1/3 em

15 anos. A comissão Europeia estima que, para isso acontecer, a electricidade proveniente de geradores eólicos tenha que crescer dos 3.7% para os 12% [1].

Em 2007 a produção de energia eléctrica por geradores eólicos cresceu mais que qualquer outra forma de produção de energia eléctrica por fontes de energia renováveis, sendo este crescimento impulsionado pela Espanha, com um aumento de cerca de 18% (figura 2), atingindo 56.635 MW.

Segundo o relatório da Rede eléctrica Nacional [3], em Portugal, no final de 2008, existia uma potência instalada de 2925MW no parque nacional eólico, correspondendo a uma potência máxima de ligação à rede de 2640MW, dos quais 590MW correspondem a novas ligações efectuadas. Estavam em funcionamento 1500 torres eólicas em 173 parques, dos quais 13 estão ligados à rede de transporte totalizando 1002MW e os restantes 1638MW estão ligados à rede de distribuição. A potência eólica ligada à rede representa 18% do total da capacidade instalada no Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Estes dados correspondem a um aumento 42% em relação ao ano anterior, totalizando 5.7TWh, representando 11% do consumo total de energia abastecida na rede pública, ou 14% do total de energia injectada na rede [2].

Estes valores têm especial interesse uma vez que grande parte da produção de electricidade em Portugal é conseguida através das centrais termoeléctricas, pela queima de carvão, óleo e gás natural. Também existe uma grande percentagem de electricidade produzida pela energia hídrica.

Em 2010 espera-se que a capacidade de produção de energia eléctrica através de torres eólicas seja de aproximadamente 3.75GW, sendo que no norte serão produzidos 1710MW, no centro 1820MW e no sul 220MW. Com este aumento espera-se que estas instalações representem 12 a 15% da energia consumida [2].

Para a produção de energia eléctrica através dum recurso natural como o vento, são actualmente utilizados vários tipos de torres eólicas, fundamentalmente torres construídas em aço tubular e gerador vertical ou horizontal, torres de treliça, torres *Airbrone* (que se diferenciam pelo gerador) e torres de betão. A decisão sobre o tipo de torre a ser implementada é efectuada com base na potência desejada, tipo de terreno

onde esta vai ser aplicada, espaço existente para aplicação desta e questões económicas.

A estrutura de uma torre eólica em aço tubular é a mais utilizada, sendo geralmente cilíndrica e tendo a sua espessura e o seu diâmetro a variar da base para o topo, requerendo pouca montagem em obra, quando comparada com a torre em treliça. Todavia, como o seu transporte é efectuado por camiões, essa estrutura está limitada a 4.4m de diâmetro da base, sendo que para dimensões superiores é necessário um transporte especial ou então uma pré montagem na obra, elevando assim os seus custos [4, 5, 6, 7]. Embora a estrutura em treliça tenha sido a primeira a ser usada para o suporte de geradores eólicos, apresentando como uma das principais vantagens a facilidade de transporte, requer, contudo, elevados custos de montagem e manutenção devido ao grande número de diferentes elementos estruturais usados na sua construção [7]. Adicionalmente, ambas as torres apresentam como desvantagem comum, problemas de corrosão. Por outro lado, a construção de estrutura de torres eólicas em betão tem vindo a ser objecto de estudo por parte de alguns autores. Refira-se contudo, que um dos estudos mais completos foi realizado por Harte *et al* [7]. De acordo com este autor, um dos principais benefícios é a possibilidade de se construir uma estrutura em betão com altura superior a 85m, apresentando esta uma estabilidade superior quando comparada com uma estrutura em aço da mesma altura. A construção em aço torna-se muito instável não conseguindo equilibrar a frequência de vibração [7]. Refira-se também que Lavassas *et al* [5] e Uys *et al* [6] estudaram o comportamento de estruturas em aço com alturas de apenas 44m e 45m, respectivamente. Uma outra importante vantagem da estrutura em betão consiste na possibilidade desta ser totalmente construída no próprio parque eólico.

Neste contexto, e com a finalidade de colmatar as limitações das estruturas de torres eólicas actuais, anteriormente descritas, desenvolveu-se uma nova metodologia que permite estudar o comportamento destas, através da aplicação do método dos elementos finitos, utilizando materiais convencionais (aço, betão), bem como materiais mais inovadores (betão polimérico, por exemplo). Adicionalmente, efectuaram-se estudos sobre diversos tipos de estruturas híbridas, envolvendo quer os materiais convencionais quer os mais inovadores.

2. Objectivos

Este trabalho de investigação compreende o desenvolvimento de uma nova metodologia, baseada na aplicação do método dos elementos finitos, a qual permite estudar o comportamento mecânico de torres eólicas utilizando vários tipos de materiais. Esta abordagem constitui uma melhoria significativa em termos de análise e optimização de torres eólicas em relação às abordagens existentes. Mais concretamente, os objectivos desta tese são:

- avaliar os tipos de torres eólicas existentes, assim como as abordagens que permitem estudar o comportamento mecânico das mesmas, bem como a influência das zonas de implantação dos parques sobre essas torres;
- desenvolver uma nova metodologia que permita estudar o comportamento mecânico de torres eólicas, de um ou vários tipos de materiais (torre híbrida), e simultaneamente constituir uma ferramenta que facilite o projecto dessas torres. Esta abordagem compreende as seguintes fases:
 - a. cálculo da velocidade do vento para as zonas onde os parques eólicos são tipicamente implementados em Portugal, de acordo com o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP);
 - b. determinação das solicitações sobre a estrutura da torre pela acção do vento. Para este efeito foi seguido o regulamento *Eurocode 1: Part 2-4* [8]. Implementação de uma rotina que permita determinar de forma semi-automática as solicitações sobre a estrutura, diminuindo consideravelmente o *input* humano.
 - c. implementação de uma rotina em linguagem de programação FORTRAN que permita efectuar o pré-processamento numérico envolvendo a geração de geometrias apropriadas, os tipos de elementos finitos utilizados e respectivas malhas. Atribuir também as propriedades mecânicas dos vários materiais assim como atribuir as condições de fronteira apropriadas. Esta rotina é também responsável pela atribuição das solicitações a que a

estrutura está submetida. Refira-se ainda que a rotina desenvolvida permite gerar os ficheiros necessários quer para o cálculo estático estrutural quer para o cálculo dinâmico (modos e frequências de vibração), efectuados através da utilização do ABAQUS.

- validar a metodologia desenvolvida através da comparação dos resultados obtidos para uma estrutura tradicional com os resultados da literatura.
- estudar o comportamento de vários tipos de torres eólicas, considerando estruturas convencionais e novas estruturas, envolvendo a utilização de materiais convencionais e inovadores, com o objectivo de otimizar as mesmas.

3. Estrutura da tese

Esta dissertação é composta por sete capítulos. Posteriormente são descritos de forma resumida, cada um deles.

Capítulos 1 – Introdução

Este capítulo contextualiza o trabalho de investigação e descreve, principalmente, a evolução das energias alternativas, em particular o crescimento da energia eólica em termos mundiais, europeus e nacionais.

Capítulos 2 – Objectivos

Neste capítulo são descritos os objectivos a atingir na tese, em particular ao nível da metodologia desenvolvida, sua validação e aplicação em termos de realização de estudos de comportamento mecânico de estruturas construídas em diversos materiais.

Capítulo 3 – Estrutura da tese

A estrutura da tese tem como objectivo ajudar o leitor a perceber como esta está dividida, facilitando a sua leitura.

Capítulo 4 – Estado da arte

Este capítulo descreve a influência das zonas de implantação dos parques eólicos sobre o projecto de torres. Faz uma revisão aprofundada sobre as diferentes estruturas das torres eólicas existentes e descreve as suas vantagens e limitações. Os diferentes tipos de abordagem existentes para estudar o comportamento mecânico das estruturas das torres são também analisados em profundidade, apontando as suas principais limitações e vantagens. Faz-se ainda uma breve descrição sobre betão e betão polimérico.

Capítulo 5 – Metodologia desenvolvida para projecto de estruturas de torres eólicas

Neste capítulo descreve-se a metodologia desenvolvida para estudar o comportamento mecânico de torres eólicas, de um ou vários tipos de materiais. Esta metodologia envolve a caracterização da velocidade do vento em função da zona de implantação do parque eólico, a determinação das solicitações sobre a estrutura da torre pela acção do vento, a selecção

dos elementos finitos apropriados, assim como a geração e validação da malha para este tipo de aplicações. A metodologia envolve ainda a imposição de constrangimentos em termos de carga crítica, modos e frequências de vibração, dado que estruturas de alturas elevadas são propensas à instabilidade. O capítulo termina com a validação da metodologia.

Capítulo 6 – Aplicação da metodologia na optimização de estruturas de torres eólicas

Neste capítulo é realizado um estudo comparativo de diferentes materiais para a construção de torres eólicas. São apresentados os resultados para torres eólicas convencionais com estrutura formada apenas por um único material, aço ou betão. São também apresentados os resultados para uma estrutura constituída apenas por betão polimérico. Apresentam-se igualmente os resultados para novas estruturas formadas por dois ou três materiais, envolvendo combinações de betão/aço, betão polimérico/aço, betão/betão polimérico e betão/betão polimérico/aço. Estes resultados são analisados e discutidos em detalhe, permitindo inferir importantes conclusões em termos de comportamento mecânico dos vários tipos de estrutura.

Capítulo 7 – conclusões e trabalhos futuros

Este capítulo apresenta uma visão global da tese. Efectua-se uma descrição sumária do trabalho de investigação desenvolvido e apresentam-se as principais conclusões. São também apontadas algumas direcções para trabalhos futuros.

4. Estado da arte

Como referido anteriormente, para a produção de energia eléctrica através dum recurso natural como o vento, são actualmente utilizadas vários tipos de estruturas de torres eólicas, fundamentalmente estruturas construídas em aço tubular e gerador vertical ou horizontal, estruturas de torres de treliça, torres *Airbrone* (que se diferenciam pelo gerador) e torres de betão. A decisão sobre o tipo de estrutura a ser implementada é efectuada com base na potência desejada, tipo de terreno onde esta vai ser aplicada, espaço existente para aplicação desta e questões económicas. Neste contexto, torna-se importante caracterizar os factores que condicionam o aproveitamento do vento, estudar os geradores eólicos, bem como as estruturas de suporte. De referir que os geradores eólicos se encontram fora do âmbito desta tese.

4.1 Caracterização dos factores que condicionam o aproveitamento do vento

Segundo o estudo *Caracterização do Escoamento Atmosférico e Locais com Elevado Potencial Eólico* [9], o local de implantação de um parque eólico depende de diversos parâmetros que condicionam de forma, mais ou menos determinante, o escoamento atmosférico de um dado local ou região, sendo apresentados de seguida os mais relevantes:

- velocidade e direcção do vento;
- orografia local;
- obstáculos e rugosidade;

Velocidade do vento

De acordo com Simões [9], para se fazer uma correcta caracterização do vento deve-se realizar pelo menos durante doze meses consecutivos, medições à velocidade e à direcção do vento. Caso seja possível, as medições devem ser prolongadas por períodos superiores de forma a reduzir as incertezas associadas à variabilidade *interanual* do escoamento atmosférico [10], tal como mostra a figura 3.

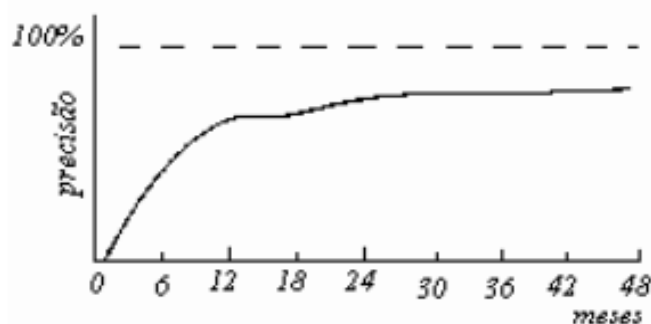


Figura 3 – Duração de uma campanha experimental vs precisão nas estimativas [10]

Moura *et al* [10] referem que as medições são geralmente efectuadas desde a altura meteorológica de referência, 10m e 80m, sendo no entanto desejável que estas sejam obtidas o mais próximo possível do rotor. Para transpor verticalmente a velocidade do vento, recorre-se a métodos estatísticos, ou às leis logarítmicas ou de potências. Esta última é utilizada no domínio da energia eólica e pode ser dada pela equação 1:

$$V = V_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\alpha} \quad eq.1$$

onde V é a velocidade que se pretende conhecer à altura h , V_{ref} é a velocidade conhecida à altura de referência, h_{ref} , e α é o coeficiente de rugosidade tabelado, ou determinado experimentalmente.

Orografia

A orografia tem um dos papéis mais importantes na caracterização do escoamento atmosférico de um dado local, dada a sua elevada dependência da complexidade do terreno em análise (terreno plano, elevações de declive suave ou terreno montanhoso).

Rugosidade

A rugosidade de um local é outro parâmetro de entrada fundamental, pois influencia de forma determinante o escoamento atmosférico junto ao solo e por consequência a energia disponível num determinado local. A rugosidade neste caso tem a ver com a ocupação do solo, isto é, vegetação, localidades, zonas de cultivo, etc.

O local ideal para a implantação de um parque eólico é caracterizado por uma rugosidade homogénea, ou seja, um local onde a vegetação não seja

de grandes dimensões e seja uniforme para não influenciar a velocidade do vento nos diferentes locais do parque.

Edifícios

Hiester *et al* [11] descreve que as perturbações produzidas pelos edifícios aumentam em altitude a jusante. O escoamento é obstruído pelo edifício formando uma esteira ainda a montante do mesmo. Após a passagem pelo obstáculo forma-se uma esteira em forma de ferradura que se estende ainda ao longo de uma determinada distância para jusante, como se pode ver na figura 4.

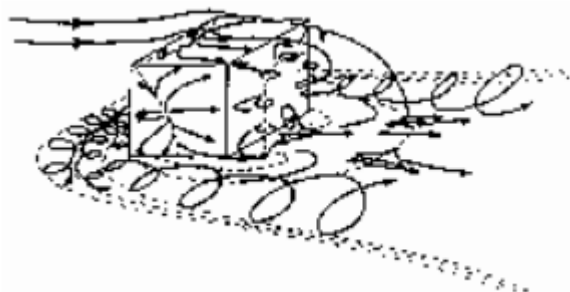


Figura 4 - Escoamento em torno de um edifício [11].

Barreiras vegetais

Geralmente as barreiras naturais são constituídas por árvores posicionadas oblíqua ou perpendicularmente ao local que se pretende proteger. Para se minimizarem estas barreiras pode-se optar por escolher um local asfaltado para jusante ou para os lados da barreira ou então a utilização de uma torre suficientemente alta para ultrapassar a mesma.

4.2 Estruturas de torres eólicas

As estruturas de suporte das torres eólicas existentes são fundamentalmente construídas em aço tubular, em treliça e em betão [9].

Neste âmbito, foram realizados vários estudos visando otimizar as estruturas de suporte das torres eólicas constituídas apenas por um material, isto é, estrutura tubular em aço ou betão, ou treliça de aço.

O estudo realizado por Bazeos *et al* [4] incidiu sobre uma estrutura tronco-cónica, em aço tubular com 38 metros de altura, dividida em três partes ligadas através de ligações aparafusadas, suportando um gerador de 450 kW. Neste estudo foram realizadas análises estáticas e dinâmicas, sendo

considerado também o efeito da gravidade. Neste estudo é ainda apresentado um modelo para descrever a interacção solo-fundação. Contudo, é referido também que existe uma prática comum em assumir a estrutura de uma torre eólica fixa ao solo. Este constrangimento é correcto em condições de solo “duro”, sendo representativo da maioria das torres implantadas. Para a fixação das torres ao solo são construídas fundações em betão armado sendo as torres posteriormente fixas ao solo através de ligações aparafusadas.

Lavassas *et al* [5] estudou o efeito da forma geométrica na concepção de uma estrutura em aço tubular para uma torre eólica com um gerador de 1MW. Também no seu trabalho foi considerado um protótipo de forma tronco-cónica com 44 metros de altura, variando a secção ao longo da estrutura. A investigação foi realizada com base no método dos elementos finitos, utilizando o elemento casca de 4 nós. A estrutura otimizada foi analisada em regime plástico e as juntas soldadas verificadas à fadiga, aplicando a metodologia descrita no Eurocode 3 [12]. Contudo, o autor conclui que um modelo linear é uma boa aproximação para o projecto destas estruturas. A figura 5 ilustra a configuração da estrutura.

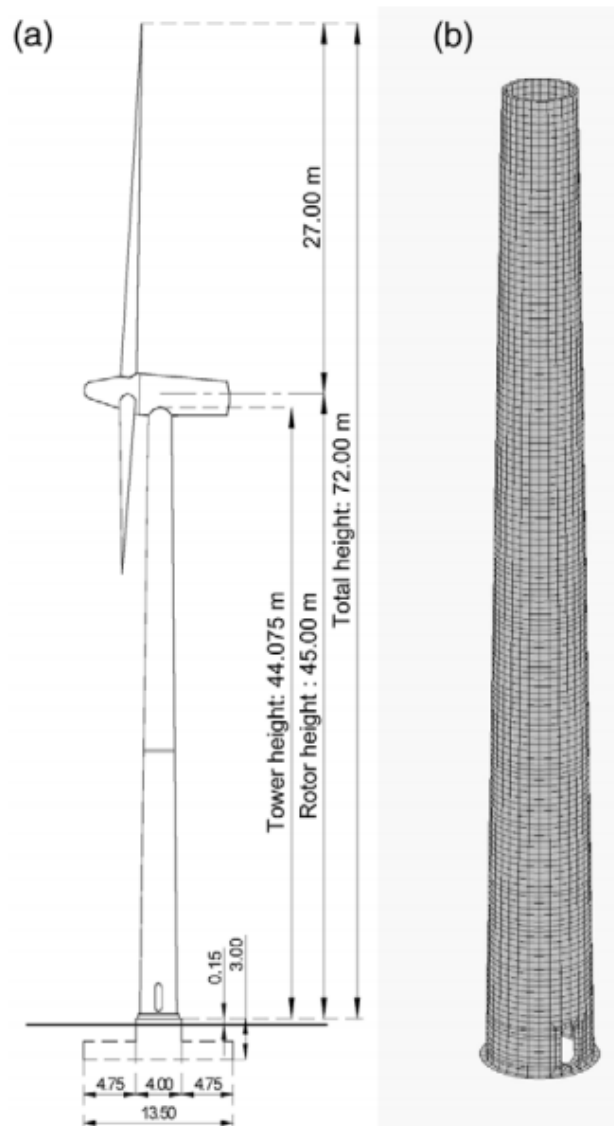


Figura 5 – Configuração da estrutura (a), modelo dos elementos finitos (b) [5]

O trabalho desenvolvido por Uys *et al* [6] consistiu na otimização dos custos para fabricação de torres eólicas. Para este efeito realizou estudos sobre o dimensionamento de estruturas de torres eólicas, utilizando como base a metodologia do regulamento Eurocode 1 Part 2-4 [8], determinando assim as solicitações devido a acção do vento. A otimização da estrutura consistiu numa redução de espessuras ao longo da altura da torre, sendo conseguida através de uma análise estática estrutural e de estabilidade.

As estruturas em betão para suportar geradores eólicos têm vindo a ser estudadas por alguns investigadores. De acordo com Harte *et al* [7], para alturas superiores a 85m, as torres de aço tornam-se muito instáveis não conseguindo equilibrar a frequência de vibração, passando o futuro da energia eólica por geradores de elevada potência, sendo que as estruturas construídas em betão pré-tensionado apresentam rigidez adequada. O autor

refere ainda que as torres em betão podem ser construídas de duas formas, ou por blocos pré-fabricados, os quais são transportados para os parques eólicos e aí montados com o auxílio de gruas, ou então podem ser construídas no local, do mesmo modo que são construídas as chaminés industriais. Neste estudo foi efectuada uma análise não linear, considerando o estado limite de rotura, através da aplicação do método dos elementos finitos utilizando o elemento casca de 4 nós isoparamétrico, com base na teoria de placas e cascas de Reissner-Mindlin [13]. As não linearidades devidas ao material de reforço e do cimento são consideradas dentro de uma abordagem por camadas, permitindo uma previsão bastante exacta da distribuição de tensões ao longo da secção transversal. Esta metodologia foi aplicada a uma estrutura em betão de uma torre eólica com altura total de 92m e um gerador de 3 MW, instalada próximo de Wilhelmshaven, na Alemanha, em 1992, com o objectivo de determinar o seu comportamento estrutural.

No relatório técnico Concrete Towers for Onshore and Offshore Wind Farms, Tricklebank et al [14] descrevem que o betão é um material que apresenta uma excelente resistência estrutural para estruturas muito altas, sendo um tipo de material muito versátil, podendo ser usado estruturalmente de diversas formas, ou seja, betão reforçado (com barras de aço ou outros materiais de reforço), betão pré-tensionado (com barras de aço pré ou pós-tensionadas ou outros materiais de reforço) ou simplesmente betão sem qualquer material de reforço. O uso de betão na construção de estruturas para as torres eólicas apresenta vários benefícios [14]:

- baixa manutenção. O betão é um material inerte que exposto a condições extremas conserva as suas propriedades mecânicas;
- competitividade e económico. As soluções de betão podem combinar um baixo custo com a melhoria do ciclo de vida das estruturas. Os materiais constituintes do betão são de custo relativamente baixo. Os processos de trabalho para a produção de betão apresentam custos relativamente baixos, sendo rotineiramente utilizados em engenharia para situações similares. Para estruturas de torres eólicas altas, em especial as que têm altura superior a 80m, o betão pode oferecer uma boa relação custo/benefício, para situações onde se pretende um longo ciclo de vida (40 a 60 anos);

- a versatilidade do betão permite conceber estruturas para torres eólicas com altura superiores às do aço tubular. Adicionalmente, o betão permite ultrapassar as restrições de acessibilidade ao local de implantação da torre eólica, que, por vezes, são colocadas às estruturas em aço tubular. Outra vantagem consiste na possibilidade do betão ser um material adaptável quanto à sua composição de modo a otimizar os parâmetros fundamentais da estrutura, tais como resistência, rigidez e densidade;
- excelente desempenho dinâmico. O betão pré-tensionado tem boas propriedades de amortecimento e elevada resistência à fadiga, proporcionando assim mais tolerância e menos risco de insuficiência dinâmica;
- baixo impacto ambiental, pois este é 100% reciclável e as libertações de CO₂ para atmosfera durante todo o processo (desde a produção até à aplicação) são muito inferiores quando comparado com as torres em aço.

Apesar das vantagens apresentadas pelos autores e dos modelos de torres eólicas em betão, estes nada referem sobre o dimensionamento destas estruturas. Utilizam uma metodologia tradicional, consumindo elevados recursos humanos para o seu dimensionamento e não conseguindo dar uma resposta rápida quando solicitado o projecto.

4.3 Betão polimérico

Nas últimas décadas tem-se investido muito na investigação de novos materiais, nomeadamente ao nível das propriedades mecânicas, tais como a resistência e o peso. Os materiais compósitos, inicialmente desenvolvidos para a engenharia aeronáutica, têm-se expandido para muitas outras áreas como a engenharia mecânica, a biomecânica e também a construção civil. A utilização destes em aplicações de engenharia civil é relativamente recente, mas tem vindo a revelar-se particularmente interessante no reforço e reparação de estruturas de betão armado.

Os materiais compósitos são essencialmente materiais constituídos por fibras embebidas numa matriz polimérica.

Os autores Ferreira [15] no seu trabalho descrevem o betão polimérico como sendo um material compósito onde uma resina termoendurecível liga inertes naturais, como a areia ou a sílica. Este betão tem como grande vantagem a sua alta resistência, elevada duração, permeabilidade muito baixa e tempos de cura rápidos. Quanto se utiliza areia fina como reforço este designa-se por argamassa polimérica.

Como referido anteriormente, este tipo de betão consiste na ligação de inertes a um polímero termoendurecível. A obtenção deste tipo de betão implica a junção de um monómero ou pré-polímero, com um endurecedor e um catalisador. Podem ser adicionados outras substâncias como plastificantes e retardantes de fogo, podem também ser utilizados acopolantes de silano para aumentar a resistência entre a matriz polimérica e o agregado.

Como reforços podem ser utilizados fibras de vidro (GF), mantas ou emaranhados, fibras de carbono (CF) e fibras de aramida (AF). Quanto às argamassas poliméricas, estas podem utilizar, como reforço, partículas como: brita, gravilha, limalha de pedra, calcário, sílica, granito, quartzo, argila, vidro expandido bem como partículas metálicas, etc.:[15]. Destes tipos de reforços as fibras de carbono são as que apresentam melhores propriedades, sendo as mais resistentes à acção de agentes químicos, imunes à corrosão e não absorvem água. Quanto às fibras de vidros têm um maior peso específico, apresentam grande sensibilidade a meios alcalinos e têm menor resistência a acções de fadiga. Por fim as de aramida apresentam grandes dificuldades na sua moldagem, têm baixa resistência à compressão, são sensíveis à fluência, à acção dos raios ultravioleta e às temperaturas elevadas [16].

Na tabela 1 sumarizam-se as propriedades típicas de diferentes materiais usados no fabrico de estruturas de Torres eólicas.

Tabela 1 - Propriedades típicas do betão, aço e fibras.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência a tracção (MPa)	Densidade (kg/m ³)
Betão	20-40	1-3	2400
Aço	200-210	240-690	7800
Fibra de vidro	69-72	1860-2680	1200-2100
Fibra de carbono	200-800	1380-6200	1500-1600
Fibra de aramida	69-124	3440-4140	1200-1500

Para se fazer a união das fibras utiliza-se uma matriz de origem polimérica, esta, além de as unir, protege-as das agressões ambientais, dos danos

mecânicos e de fenómenos de instabilidade. Normalmente as matrizes utilizadas para a união das fibras são resinas termoendurecíveis. A mais utilizada é a resina epoxídica, pois esta apresenta excelentes propriedades em termos de aderência, boa resistência quer mecânica quer à agressividade do meio e não absorve água. A tabela 2 apresenta as propriedades das resinas mais utilizadas nos compósitos.

Tabela 2 – Propriedades das resinas utilizadas nos compósitos

Resina	Módulo de elasticidade a tracção (GPa)	Resistência a tracção (MPa)	Extensão na rotura (%)	Densidade (kg/m³)
Polyester	2.1-4.1	20-100	1.0-6.5	1000-1450
Epoxi	2.5-4.1	55-130	1.5-9.0	1100-1300

Quanto aos sistemas de reforço por CFRP (compósitos com reforço de fibras de carbono) existem dois tipos, os pré-fabricados e os sistemas curados "in situ". Os pré-fabricados são fornecidos sob a forma de perfil, quer seja circular, rectangular ou quadrangular. Nestes, as fibras são dispostas no sentido longitudinal sendo por isso um reforço unidireccional. No caso dos "in situ", as fibras são fornecidas em separado da resina, sendo a sua aplicação feita no local onde se vai implementar o reforço. Este sistema é o ideal para fazer reforços em zonas circulares ou com geometrias mais complexas.

A quantidade de ligante é relativamente pequena, geralmente é determinada pela dimensão dos agregados, mas ronda os 5 a 15% do peso total, no caso das argamassas de areia fina poderão ser utilizadas maiores quantidades de resina.

Este materiais têm uma boa resistência ao ataque químico e a outros agentes corrosivos, muito baixas propriedades de absorção de água, boa resistência a abrasão e marcada resistência à congelação – descongelação.

Devido à grande resistência do betão polimérico em relação ao tradicional betão *Portland*, poder-se-á obter ganhos em termos da quantidade de material. Este também apresenta boas propriedades químicas e físicas, que geralmente são determinadas mais pela natureza do polímero de ligação, do que pelo tipo de reforço utilizado. As propriedades da matriz polimérica são altamente dependentes do tempo e da temperatura à qual esta é exposta.

As propriedades mecânicas destes compósitos dependem da formulação com que são produzidos; o módulo de elasticidade pode variar entre os 20 e

os 50 GPa, a sua deformação à fractura por tracção é geralmente de 1%, a deformação varia com o tipo de polímero utilizado.

São vários os tipos de monómeros e pré-polímeros usados para produzir os betões poliméricos, sendo mais frequente utilizar polímeros na base de quatro monómeros: metilmetacrilato (MMA), polímero de estireno de poliéster, endurecedor pré-polimérico de epóxido (monómero de ligação cruzada) e álcool sulfúrico. Para se seleccionar o tipo de polímero a utilizar devem-se fazer algumas considerações tais como reacção de polimerização, temperatura de fusão e transição vítrea.

San – José *et al* [17], estudaram duas resinas termoendurecíveis para a construção de betão polimérico. Estes analisaram um compósito do tipo U que era constituído por uma resina isoftálica de poliéster isophthalic e uma do tipo G do tipo orthophthalic. Assim foram produzidos dois compósitos diferentes, quer do ponto de vista químico quer micro estrutural. Os compósitos elaborados continham 12% de resina na sua constituição.

5. Metodologia desenvolvida para projecto de estruturas de torres eólicas

Nas secções anteriores descreveram-se vários métodos para modelar o comportamento mecânico de estruturas de torres eólicas. Contudo, estes métodos foram exclusivamente aplicados a estruturas formadas apenas por um único material, em particular estruturas em aço tubular ou betão. Os estudos desenvolvidos incidiram em estruturas de aço tubular de 44m e 45m de altura, o que constitui uma limitação em termos da capacidade de aproveitamento do vento assim como da relação espaço ocupado/energia produzida. Estes métodos apresentam ainda limitações em termos de comportamento mecânico e do próprio transporte, sempre que se pretendem implementar torres com alturas superiores a 80m. Neste sentido, foram desenvolvidos alguns estudos sobre estruturas em betão, visando colmatar algumas das lacunas próprias das estruturas em aço tubular. Como referido no capítulo 4, os resultados obtidos por alguns autores demonstram que o comportamento mecânico deste tipo de estrutura é superior ao da estrutura em aço tubular para torres de elevadas alturas. A versatilidade do betão permite ainda ultrapassar as restrições de acessibilidade ao local de implantação da torre eólica, que por vezes são colocadas às estruturas em aço tubular. Outra vantagem consiste na possibilidade do betão ser um material adaptável quanto à sua composição de modo a otimizar os parâmetros fundamentais da estrutura, tais como resistência, rigidez e densidade. Contudo, estas estruturas podem apresentar limitações em termos de corrosão e embora mais leves do que as de aço tubular são ainda estruturas muito pesadas, podendo ser optimizadas pela introdução de materiais mais inovadores.

É neste contexto que se insere o desenvolvimento de uma nova metodologia, baseada na aplicação do método dos elementos finitos, permitindo estudar o comportamento mecânico de torres eólicas utilizando vários tipos de materiais, incluindo os tradicionais, bem como materiais mais inovadores. Esta abordagem constitui uma melhoria significativa em termos de análise e optimização de torres eólicas em relação a outras existentes, quer em termos da possibilidade de prever o comportamento de uma estrutura formada por vários materiais quer em termos de reduzir substancialmente o esforço humano colocado no projecto de estruturas para torres eólicas, reduzindo portanto a possibilidade da ocorrência de erros

associados à intervenção humana. Outra vantagem do modelo de elementos finitos utilizado nesta metodologia consiste na modelação das flanges de ligação entre os vários troços que formam a estrutura da torre eólica. Para tal, são utilizados dois tipos de elementos finitos, elemento casca e sólido. O modelo encontra-se descrito em pormenor nas secções seguintes.

Esta metodologia encontra-se esquematizada, de forma simplificada, no fluxograma da figura 6, englobando:

- o cálculo da velocidade do vento para as zonas onde os parques eólicos são tipicamente implementados em Portugal, de acordo com o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP)[18];
- a determinação das solicitações sobre a estrutura da torre pela acção do vento. Para este efeito desenvolveu-se a rotina de cálculo de solicitações, tendo por base o regulamento *Eurocode 1: Part 2-4* [5].
- a implementação de uma rotina que efectua o pré-processamento numérico envolvendo a geração de geometrias apropriadas, os tipos de elementos finitos utilizados e respectivas malhas. Atribuir também as propriedades mecânicas dos vários materiais assim como atribuir as condições de fronteira apropriadas. Esta rotina é também responsável pela atribuição das solicitações a que a estrutura está submetida. Refira-se ainda que a rotina desenvolvida permite gerar os ficheiros necessários quer para o cálculo estático estrutural quer para o cálculo dinâmico (modos e frequências de vibração), efectuados através da utilização do ABAQUS.
- a necessidade de modificar a geometria exterior da estrutura da torre, em particular os seus diâmetros da base e topo assim como os vários valores de espessura.
- a implementação de uma rotina que efectua o cálculo da carga crítica e compara a carga aplicada à estrutura segundo o eixo vertical da mesma.
- a verificação da optimização da estrutura da torre eólica por processo iterativo. Caso a estrutura esteja optimizada o processo termina. Caso contrário o processo repete-se voltando à rotina de pré-

processamento ou à rotina de cálculo de solicitações (função da necessidade da alteração da geometria exterior da estrutura).

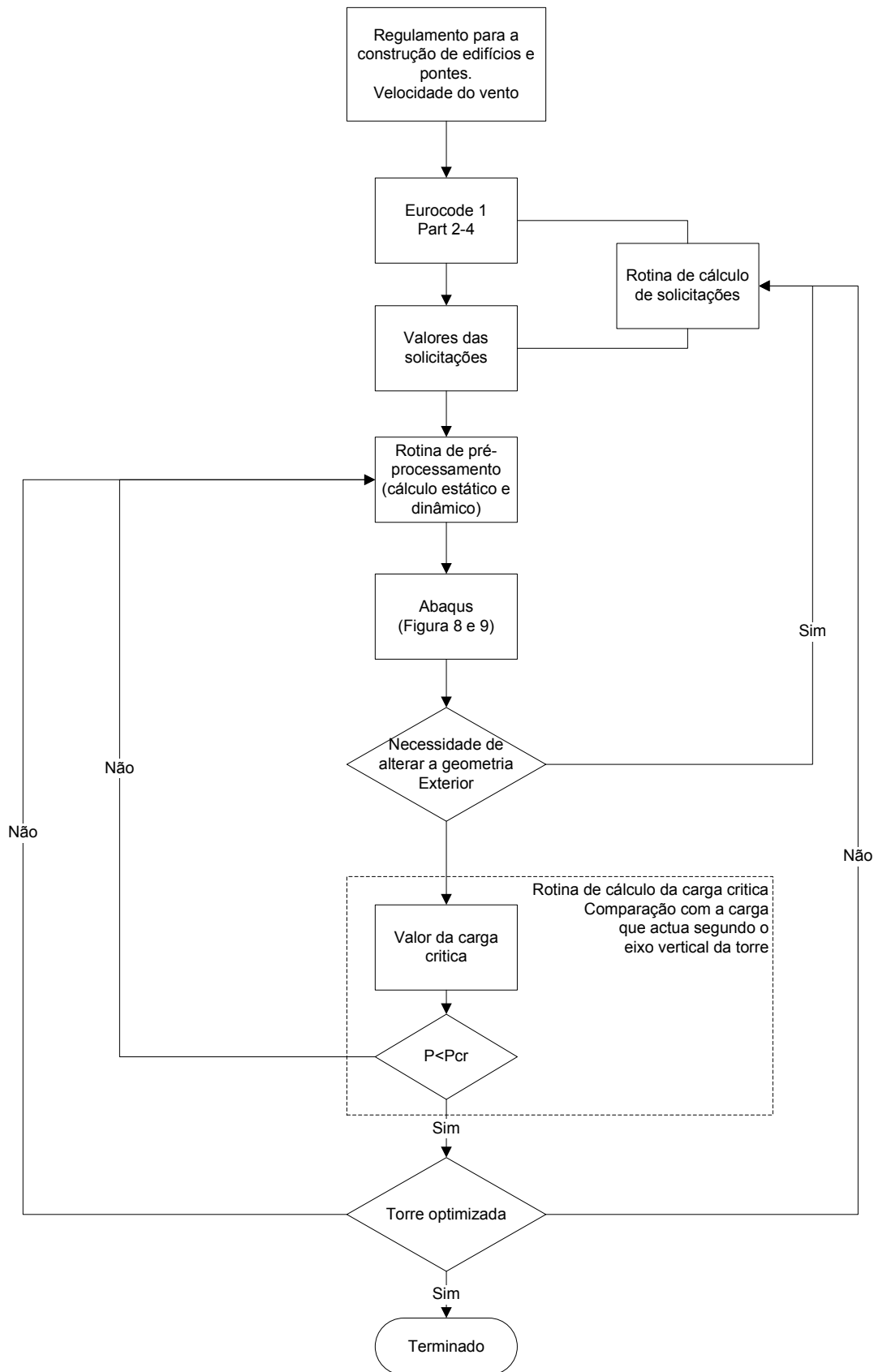


Figura 6 – Fluxograma da metodologia

5.1 Cálculo da velocidade do vento

O cálculo da velocidade do vento é efectuado segundo Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes [18]. Para tal, estabelece-se a zona em que o parque eólico vai ser implantado assim como a rugosidade do terreno e a existência de obstáculos. No caso dos parques eólicos, estes geralmente encontram-se na zona B, que é para localizações junto à costa ou para alturas superiores a 600m. Quanto ao tipo de terreno este é do tipo II, ou seja, encontra-se em zonas rurais ou periferias de cidades. Este regulamento indica a equação 2 para o cálculo da velocidade do vento.

$$V = 25 \left(\frac{h}{10} \right)^{0.20} \quad eq. 2$$

5.2 Solicitações exercidas sobre a estrutura de uma torre eólica

A determinação das solicitações sobre as estruturas das torres pela acção do vento é realizada pela rotina de cálculo de solicitações, tendo por base o regulamento *Eurocode 1: Part 2-4* [8]. As forças e o momento que o gerador causa no topo da estrutura devido a acção do vento para condições extremas seguem a metodologia aplicada por Lavassas *et al.* [5]. Na figura 7 representam-se essas solicitações.

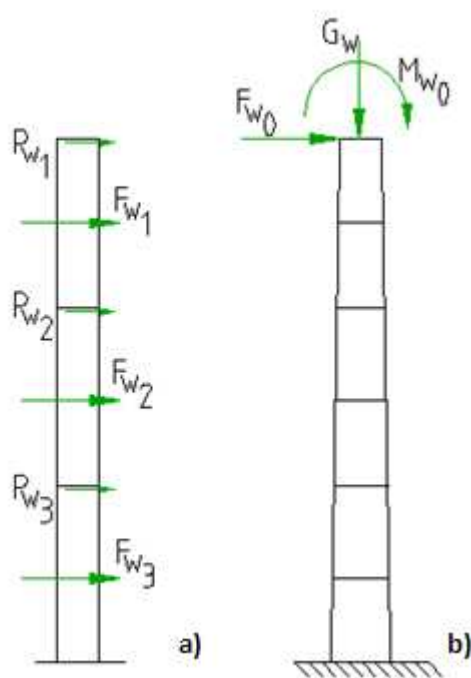


Figura 7 - Diagrama das solicitações. Forças exercidas pelo vento directamente sobre a estrutura da torre (a) [6]. Forças e momentos exercidos pelo gerador sobre a estrutura da torre (b) [6].

Forças exercidas directamente sobre a estrutura de uma torre

Tendo por base o Eurocode 1 part 2-4 [8] a velocidade média do vento provoca sobre a estrutura uma força F_w que pode ser calculada pela equação 3

$$F_w = q_{ref} c_e(z) c_d A_{ref} \quad eq.3$$

Sendo que A_{ref} é a área efectiva e $q_{ref} = \frac{\rho_0}{2} v_{ref}^2$ eq. 4

Em que a densidade do ar, $\rho_0 = 1.25 \text{ kg/m}^3 = 1.25 \text{ Nm}^{-4} \text{ s}^2$ e a velocidade média para o tipo de terreno em que estes é implementado para Portugal é de cerca de 25m/s segundo o regulamento para a construção de edifícios e pontes [18].

$$\text{O factor } c_e(z) = c_r^2 c_t^2 (1 + 2gl_v) \quad eq.5$$

onde $g=3.5$, e z a altura em m,

$$l_v = \frac{k_r}{c_r c_t} \quad eq.6$$

$$c_r = K_T \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad eq.7$$

onde os valores K_T , c_t e z_0 são retirados através da tabela 8.1 da Ref. [8]. O cálculo do valor c_e é dado pela tabela 1 da mesma fonte.

O factor dinâmico do movimento da turbina é dado pela tabela 9.5 da Ref. [8], sendo este obtido em função da altura e do diâmetro médio da estrutura.

O factor de força é dado pela equação 8.

$$c_f = c_{f0} \psi_\lambda \quad eq. 8$$

C_{f0} é obtida através da figura 10.8.2 [8]. Este é apresentado em função do número de Reynolds, Re e do rácio k/D .

$$Re = \frac{D v_m}{\nu} \quad eq. 9$$

$$v_m = c_r v_{ref} \quad eq. 10$$

Onde ν é a viscosidade do ar, $\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Através da tabela 10.8.1 [8] retira-se o valor de k , este varia conforme o tipo de material que a torre é construída. Na tabela 10.8.2 retira-se o valor de c_{f0} .

Os coeficientes de esbeltez l/D para a área efectiva φ , são utilizados para determinar ψ_λ , através da tabela 10.14.1 na Ref. [8].

Forças e momentos que o gerador exerce sobre a estrutura de uma torre

Como referido anteriormente, as forças e o momento que o gerador causa no topo da estrutura devido à acção do vento para condições extremas seguem a metodologia de Lavassas *et al.* [5].

5.3 Rotina de pré-processamento

A rotina de pré-processamento numérico envolve a geração de geometrias apropriadas, os tipos de elementos finitos utilizados e respectivas malhas, atribui também as propriedades mecânicas dos vários materiais, assim como as condições de fronteira apropriadas. Esta rotina é também responsável pela atribuição das solicitações a que a estrutura está submetida. Como mencionado anteriormente, esta rotina gera também os ficheiros necessários quer para o cálculo estático estrutural quer para o cálculo dinâmico (modos e frequências de vibração), efectuados através da

utilização do ABAQUS. As figuras 8 e 9 mostram as duas estruturas desta rotina assim como o fluxo de informação. A primeira é responsável por gerar os ficheiros necessários para o cálculo estático estrutural, enquanto a segunda gera os ficheiros necessários para o cálculo dinâmico (modos e frequências de vibração) executado pelo ABAQUS. Com base na figura 8, pode-se observar quais os parâmetros de projecto, as solicitações assim como o número de nós distribuídos ao longo de cada anel e por secção em altura, que são necessários introduzir pelo utilizador. Nesta rotina, função do processo de optimização pretendido, o utilizador pode seguir duas vias: na primeira tem apenas de introduzir iterativamente os novos valores para o parâmetro espessura (E_i com $i=1...3$), dado que os raios exteriores se mantêm constantes durante todo o processo de optimização. No segundo modo, o utilizador deverá introduzir os parâmetros de projecto, nomeadamente os valores para a espessura (E_i com $i=1...3$), para os raios (raio da base R_1 e raio do topo R_2) e solicitações, dado que a alteração da geometria exterior implica calcular novos valores para as solicitações (F_{W1} , F_{W2} , F_{W3} , P_{W1} , P_{W2} , P_{W3} , F_{W0} , M_{W0} e G_{W0}), sendo estas, função da geometria exterior da estrutura da torre. Note-se que nesta rotina o utilizador tem também a possibilidade de variar a altura total da estrutura da torre (H) ou, independentemente, cada uma de três alturas parciais (H_1 , H_2 e H_3) em que a torre pode ser dividida.

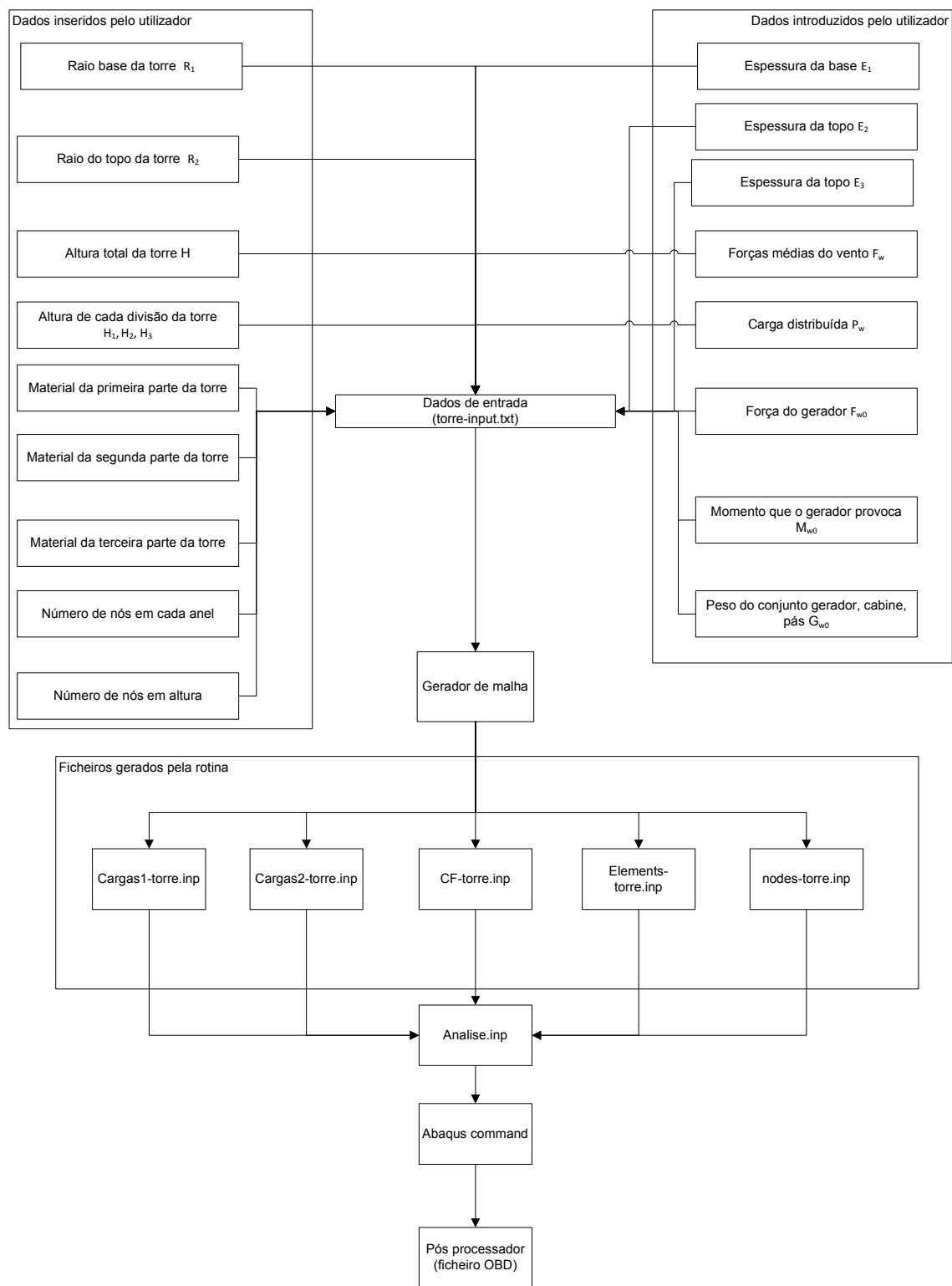


Figura 8 – Fluxograma com metodologia para cálculo estrutural

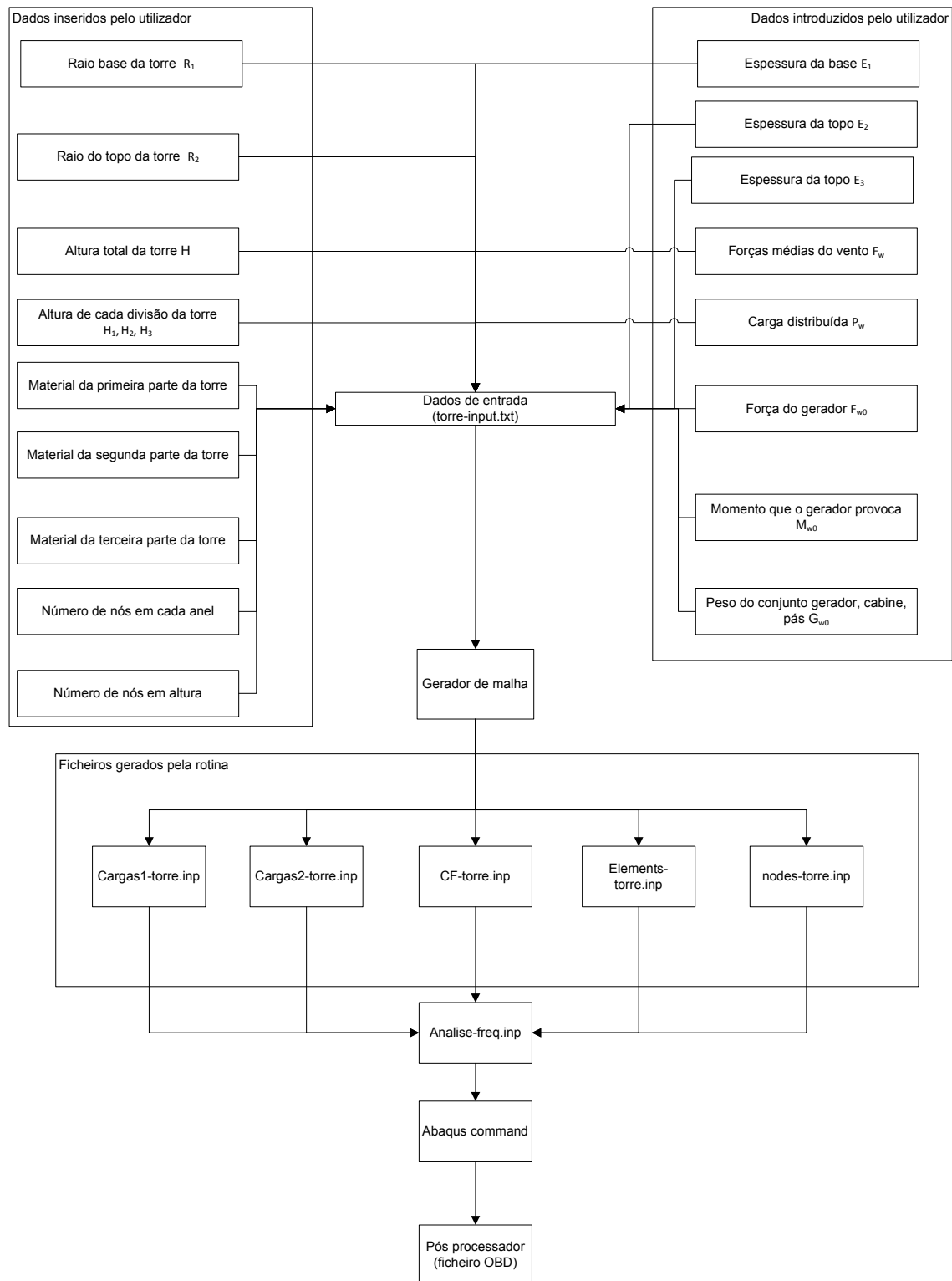


Figura 9 – Fluxograma com metodologia para cálculo de frequências e modos de vibração

Finalmente, esta rotina gera também os ficheiros necessários para a fase de processamento no ABAQUS.

5.4 Programa de análise de elementos finitos

Para esta tese foi escolhido o ABAQUS para executar as várias análises numéricas. Esta ferramenta é largamente aplicada em investigação e considerada por muitos investigadores uma das melhores ferramentas comercialmente disponíveis. O ABAQUS possui elementos finitos apropriados para modelar o comportamento típico de estruturas tipo casca. À estrutura de suporte de um gerador eólico pode-se aplicar a teoria de placas e cascas de Reissner-Mindlin [13] para prever com rigor o comportamento mecânico da mesma.

Portanto, a parede da estrutura de uma torre eólica pode ser representada por elementos casca. Neste trabalho seleccionou-se o elemento S4 (terminologia do Abaqus), o qual possui 4 nó e seis graus de liberdade por nó, três translações em x , y e z e três rotações em torno dos eixos x , y e z . Este também assume que o esforço transversal ao corte é constante ao longo do elemento, obtendo-se assim uma melhor aproximação ao corte segundo a orientação dos elementos [19]. A figura 10 representa esquematicamente o elemento.



Figura 10 – Geometria do elemento finito casca usado para representar a estrutura de uma torre eólica [19].

De acordo com [19], o elemento S4 é usado geralmente para problemas de casca e membrana, estando formulado para que as tensões sejam exactas para problemas de flexão, não é sensível à distorção do elemento e evita bloqueios nas tensões de corte. Adicionalmente, foi seleccionado um elemento finito sólido hexaedro de 8 nós (o nome de código do ABAQUS é C3D8), para modelar o comportamento das flanges de ligação entre os vários troços da estrutura de suporte do gerador eólico. A figura 11 representa esquematicamente o elemento.

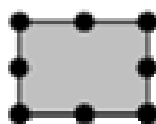


Figura 11 – Geometria do elemento finito sólido usado para representar as flanges [19].

Estes dois elementos finitos são combinados de modo a evitar problemas com a conectividade da malha, como se ilustra na figura 12.

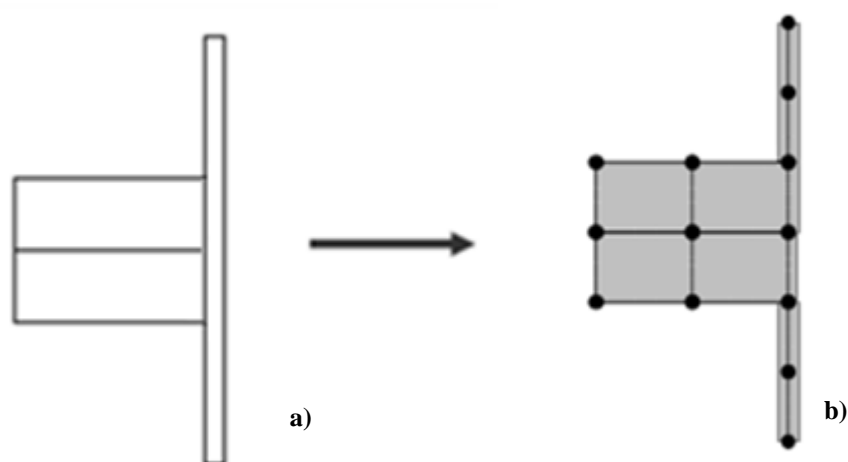


Figura 12 - Geometria representativa da união da flange com a torre (a). Interface dos elementos finitos casca-sólido (b).

A incorporação das flanges no modelo de elementos finitos pode revestir-se de bastante interesse, pois permite obter um comportamento mais aproximado ao comportamento real da estrutura. Outra vantagem é a de melhorar o comportamento do modelo na análise estática, pois funciona como um reforço da estrutura.

5.4.1 Análise de convergência

O método dos elementos finitos é um método de aproximação, assim quanto menor for o tamanho dos elementos finitos mais próxima é a solução do valor real. Por outro lado, diminuindo o tamanho dos elementos aumenta o tempo de cálculo. Devido a este problema Rizzo *et al* [20], estudou o efeito do tamanho dos elementos na solução final. No seu estudo o autor concluiu que para uma solução ser admissível o erro tem que ser inferior a 0.5%. Com base nos vários estudos apresentados verificou-se que a malha 3 possuía um erro de 0.18%, portanto bastante inferior a esse valor (tabela 3). A figura 13 apresenta a análise de convergência efectuada resultante das várias malhas de elementos finitos estudadas para o efeito. A

figura 14 apresenta três malhas diferentes, uma correspondente ao maior erro (figura 14 a)), outra representa a mais refinada (figura 14 c)) e a malha óptima (figura 14 b)).

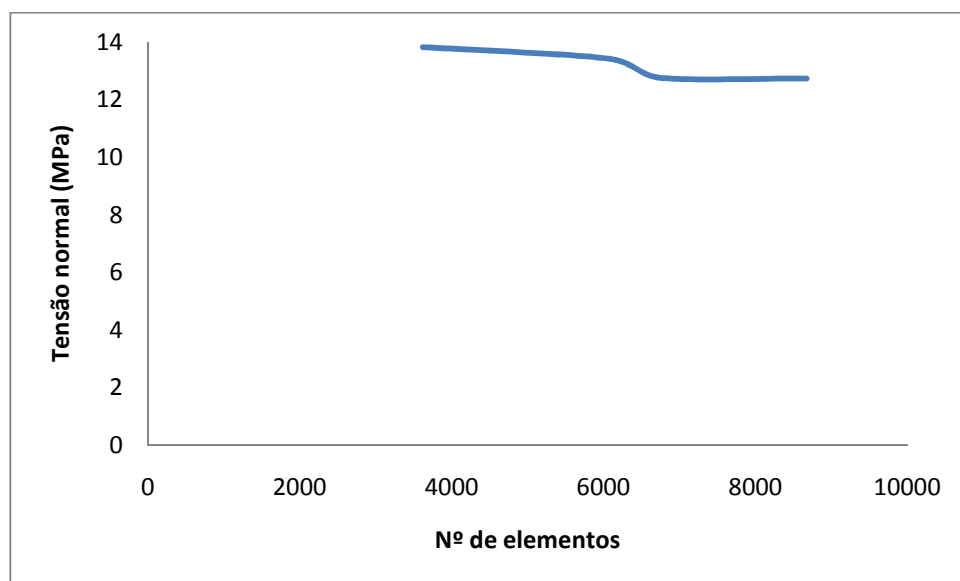


Figura 13 - Análise de convergência

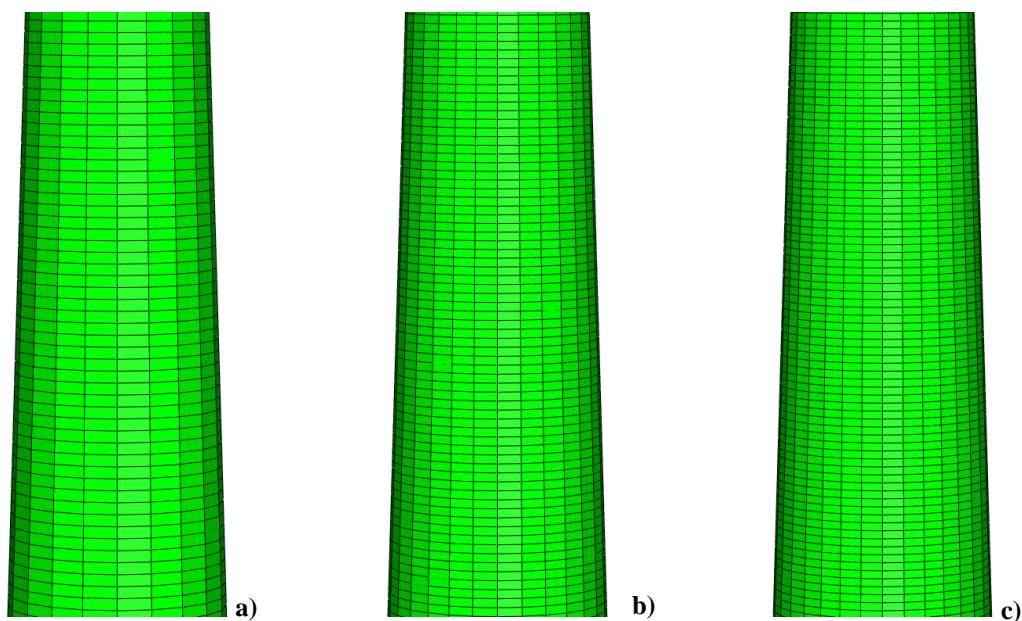


Figura 14 – Malha com 3621 elementos (a). Malha com 6749 elementos (b). Malha com 8673 elementos (c).

Tabela 3 – Resultados da análise de convergência

Malha	Nº de elementos	Nº de nós	Tensão no nó 1 (MPa)	Erro
1	3621	3621	13,821	2,9%
2	5065	6065	13,421	4,9%
3	6749	6749	12,759	0,18%
4	8673	8673	12,7356	

Os valores calculados para os erros associados a cada uma das malhas obtiveram-se pela equação 11:

$$Erro = \left| \frac{X_1 - X}{X} \right| \times 100 \quad eq. 11$$

5.5 Análise de estabilidade

As estruturas de suporte do gerador eólico estudadas nesta tese têm 100m de altura, tratando-se portanto de uma estrutura muito alta e que suporta elevadas solicitações. Para este efeito, torna-se necessário incluir na metodologia análises de estabilidade.

Assim, calcula-se a carga crítica através da equação 12:

$$P_{critico} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad eq. 12$$

onde I é o segundo momento de área, sendo estas variáveis determinadas pelas equações 13, respectivamente:

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad eq. 13$$

5.6 Análise dinâmica

A análise dinâmica consiste na determinação das características de vibração das estruturas de torres eólicas, nomeadamente na determinação das frequências naturais e modos de vibração. Este cálculo realiza-se com base no *Eurocode 1: Part 2-4* [8]. O modelo de elementos finitos considera o peso próprio da estrutura, assim como a aplicação de uma massa pontual no topo da estrutura da torre equivalente à massa do gerador eólico. O modelo apresenta-se na figura 15.

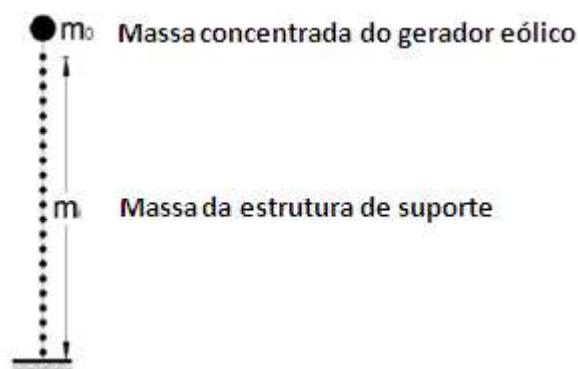


Figura 15 - Modelo de elementos finitos para análise dinâmica. Adaptado de [5].

5.7 Validação da metodologia

A comparação de resultados numéricos obtidos pela aplicação da metodologia aqui desenvolvida com resultados obtidos por Uys *et al* [6], permitiu validar esta abordagem para optimização de estruturas de torres eólicas. Aplicou-se esta metodologia à estrutura estudada pelo autor referido, obtendo-se resultados muito similares para as análises estática e dinâmica, os quais se apresentam na tabela 4. A figura 16 mostra a distribuição de tensões equivalentes de Von-Mises, bem como os dois primeiros modos de vibração da estrutura.

Tabela 4 Comparação de resultados obtidos pelos dois métodos

	Coefficiente de segurança	Primeira frequência de vibração	Segunda frequência de vibração
Nova metodologia	1.41	0.515	5.943
Metodologia de Uys <i>et al</i> [6]	1.50	0.600	6.000

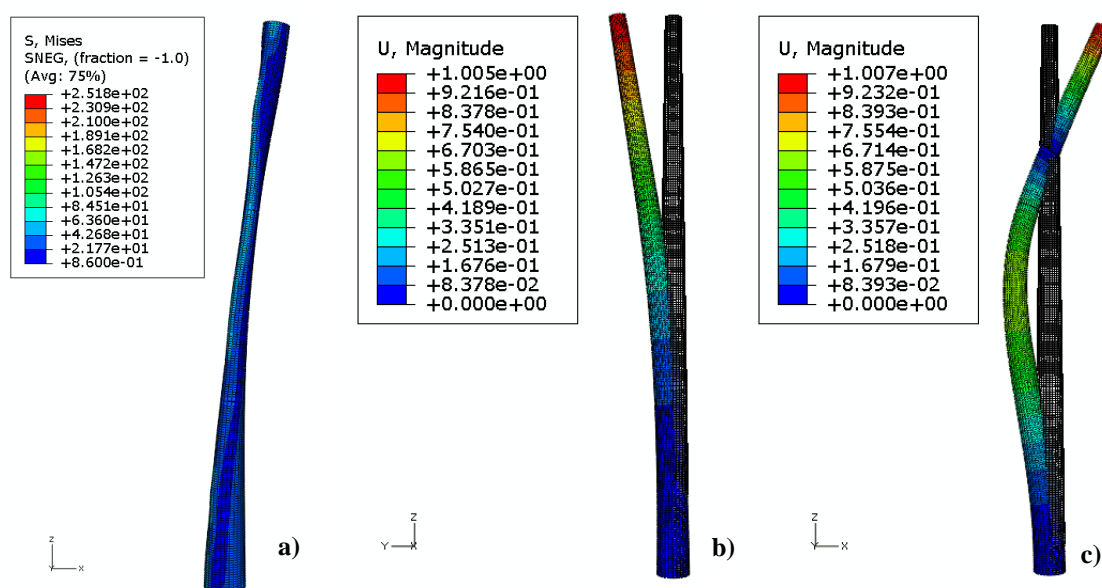


Figura 16 - Distribuição de tensões de Von-Mises (a). Primeiro modo de vibração (b). Segundo modo de vibração (c).

Refira-se também que da análise bibliográfica realizada, todos os estudos tem por base os Euro-códigos [8, 12]. Estes constituem também a base da metodologia aqui desenvolvida.

6. Aplicações da metodologia de optimização

De acordo com a bibliografia disponível, as estruturas de torres eólicas estudadas através da aplicação do método dos elementos finitos têm-se limitado apenas a estruturas simples, ou seja, estruturas formadas apenas por um único material. A metodologia aqui desenvolvida permite estudar o comportamento mecânico de estruturas de torres eólicas, de um ou vários tipos de materiais e foi aplicada a vários casos de estudo. Para este efeito foram considerados sete tipos de estruturas de torres eólicas com a mesma geometria exterior e altura de 100m.

6.1 Materiais usados na composição das estruturas

De acordo com o descrito acima, os materiais usados para obter um melhor comportamento mecânico das estruturas de torres eólicas, encontram-se descritos na tabela 5:

Tabela 5 - Varias estruturas formadas por diferentes materiais

Estrutura da torre	Material		
	Altura H_1	Altura H_2	Altura H_3
1	Aço	Aço	Aço
2	Betão	Betão	Betão
3	Betão polimérico	Betão polimérico	Betão polimérico
4	Betão	Betão	Aço
5	Betão	Betão polimérico	Aço
6	Betão	Betão	Betão polimérico
7	Betão polimérico	Betão polimérico	Aço

As várias estruturas de torres eólicas estudadas representam-se esquematicamente na figura 17.

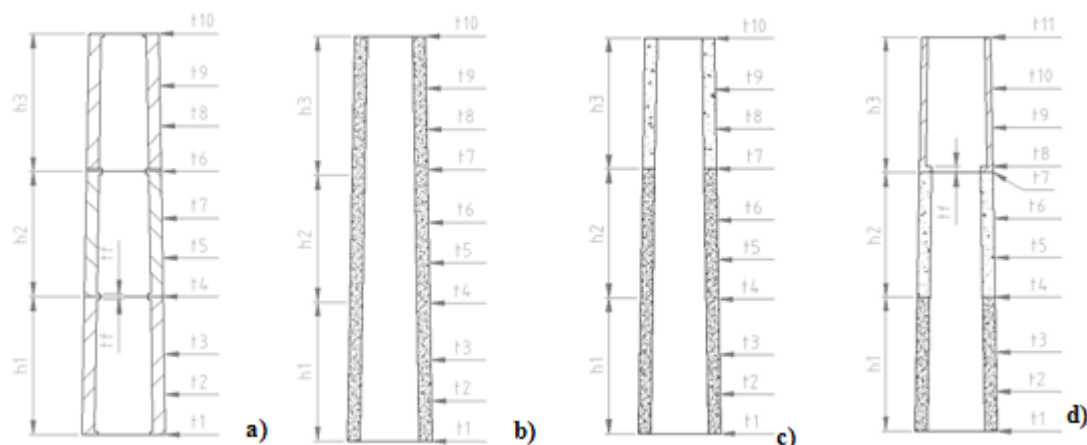


Figura 17 – Estruturas de torres eólicas estudadas. Estrutura em aço st 37 ($h_1+h_2+h_3$) (a). Estrutura em betão ($h_1+h_2+h_3$) ou betão polimérico ($h_1+h_2+h_3$) (b). Estrutura híbrida: betão (h_1+h_2) / betão polimérico (h_3) (c). Estrutura híbrida: betão (h_1+h_2) / aço (h_3), betão polimérico (h_1+h_2) / aço (h_3) ou betão (h_1) / betão polimérico (h_2) / aço (h_3) (d).

Para aplicar a metodologia de optimização é necessário obter a curva tensão/extensão característica de cada tipo de material. Para tal, elaboraram-se os gráficos respectivos com base em dados da bibliografia, assim como tabelas com propriedades mecânicas necessárias ao processo de optimização, nomeadamente a densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e como já referido a curva tensão/extensão de cada material, figuras 18 a 20.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos materiais estudados

	Aço St 37	Betão	Betão polimerico
Módulo de elasticidade (GPa)	210	39.2	30.492
Coeficiente de Poisson	0.3	0.20	0.21
Densidade (Kg.m⁻³)	7850	2706	2270

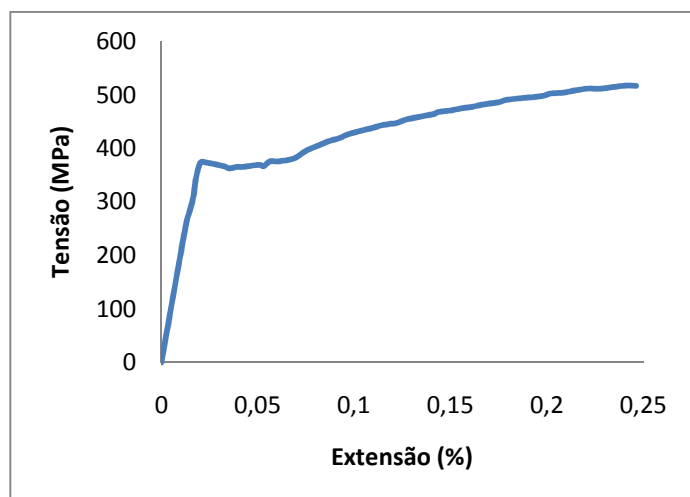


Figura 18 – Curva tensão vs extensão do aço

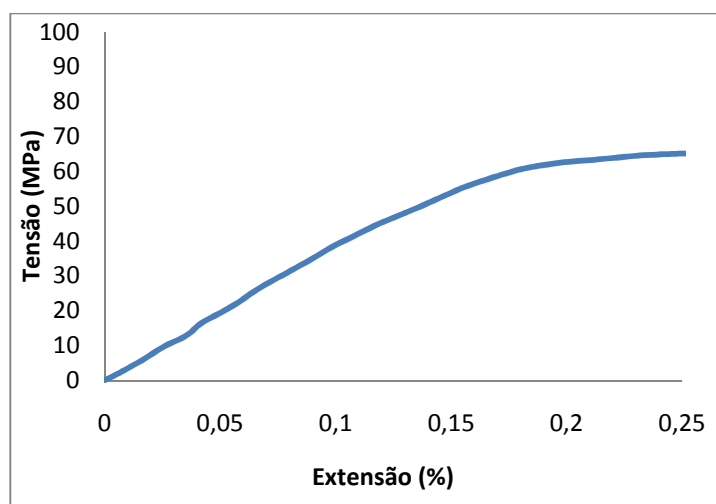


Figura 19 – Curva tensão vs extensão do betão [21]

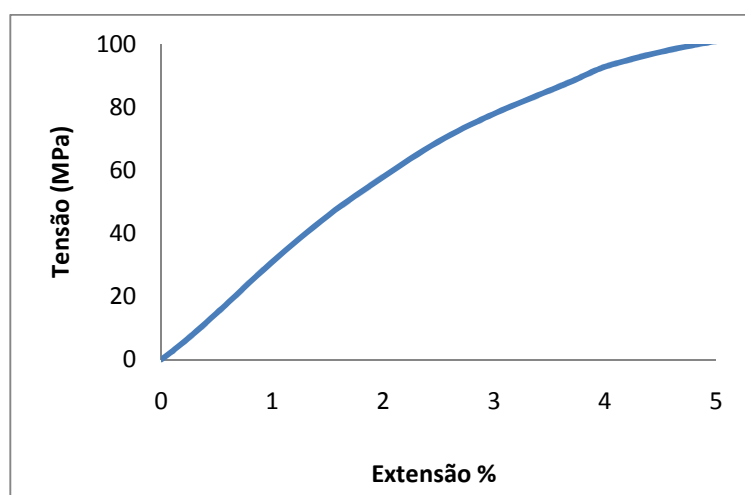


Figura 20 – Curva tensão vs extensão do betão polimérico [7]

6.2 Solicitações

Para determinar as solicitações é necessário assumir o tipo de gerador eólico. Nos casos aqui estudados considerou-se uma torre com um gerador eólico de 1 MW.

As solicitações a que uma estrutura de torre eólica está sujeita, encontram-se bem descritas na figura 7 da secção 5.2, envolvendo Forças exercidas pelo vento directamente sobre a estrutura e forças e momentos exercidos pelo gerador eólico sobre a mesma estrutura. Os valores destas solicitações foram obtidos com base nas equações 2, 3 e 4 do capítulo 5, apresentando-se na tabela 7. Note-se que os valores para a força F_{w0} , momento flector M_{w0} e peso G_{w0} , são obtidos a partir das características do gerador eólico utilizado [5].

Tabela 7 – Valores das solicitações para as diferentes torres

Estrutura da torre	F_{w1} (kN)	F_{w2} (kN)	F_{w3} (kN)	P_{w1} (kN/m)	P_{w2} (kN/m)	P_{w3} (kN/m)	F_{w0} (kN)	M_{w0} (kN.m)	G_w (kN/m ²)
1	154,7	195,43	225,45	3,38	5,30	6,19	282	997	114,2
2	167,01	204,74	239,8	4,30	5,59	6,58	282	997	114,2
3	167,01	204,74	239,8	4,30	5,59	6,58	282	997	114,2
4	154,70	204,74	239,8	3,38	5,59	6,58	282	997	114,2
5	154,70	204,74	239,8	3,38	5,59	6,58	282	997	114,2
6	154,70	204,74	239,8	3,38	5,59	6,58	282	997	114,2
7	154,70	204,74	239,8	3,38	5,59	6,58	282	997	114,2

6.3 Resultados

Como referido anteriormente, a metodologia aqui desenvolvida foi aplicada a sete casos de estudo, tendo como objectivo a obtenção de estruturas de torres eólicas que apresentem uma melhor resposta mecânica em termos estáticos e dinâmicos, tornando-as assim mais competitivas em termos técnicos e económicos.

6.3.1 Análise estática

Os resultados obtidos através da análise estática representam as distribuições das tensões equivalentes e deslocamentos para as diferentes estruturas estudadas e correspondem às versões optimizadas das estruturas, de acordo com as seguintes configurações geométricas, figura 21.

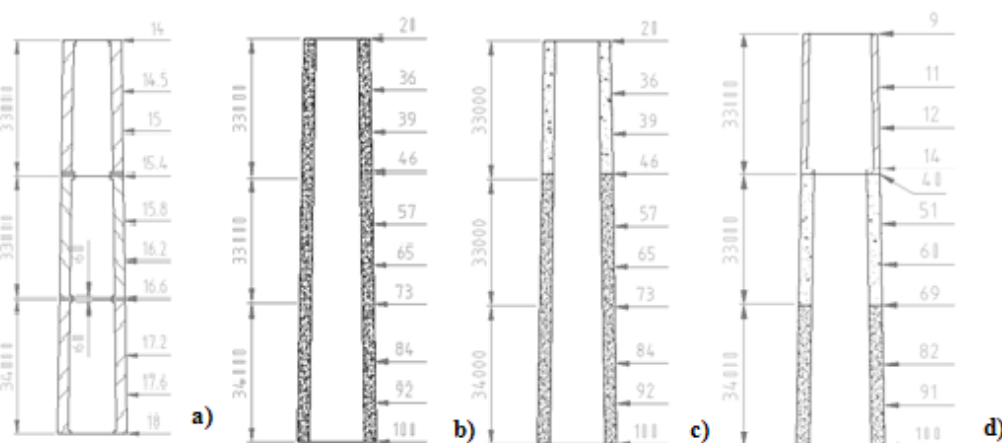


Figura 21 – Estruturas de torres eólicas estudadas. Estrutura em aço st 37 ($h_1+h_2+h_3$) (a). Estrutura em betão ($h_1+h_2+h_3$) ou betão polimérico ($h_1+h_2+h_3$) (b). Estrutura híbrida: betão (h_1+h_2) / betão polimérico (h_3) (c). Estrutura híbrida: betão (h_1+h_2) / aço (h_3), betão polimérico (h_1+h_2) / aço (h_3) ou betão (h_1) / betão polimérico (h_2) / aço (h_3) (d).

Os campos de tensões equivalentes e deslocamentos são apresentados nas figuras 22 a 28

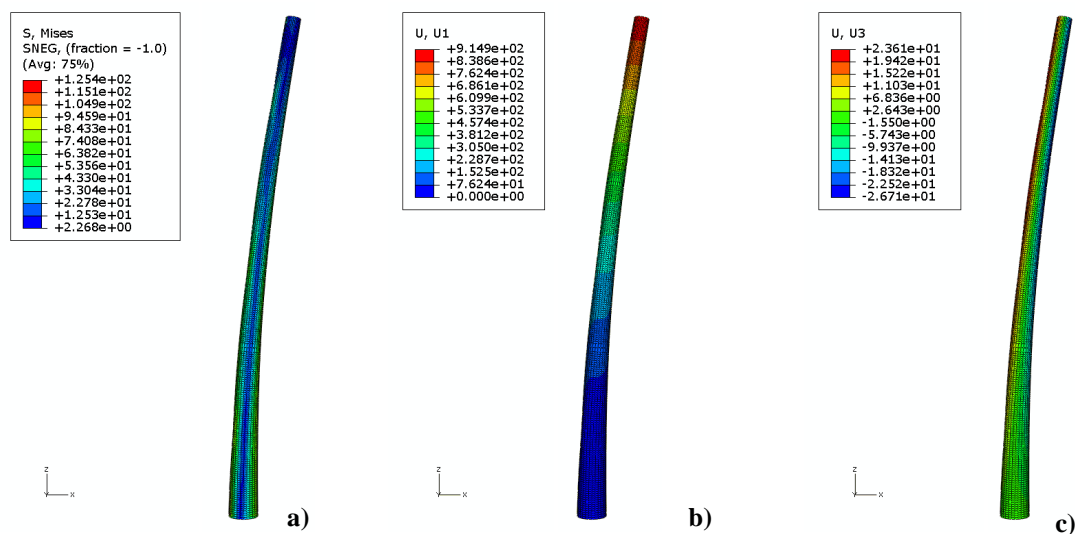


Figura 22 – Estrutura da torre 1. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).

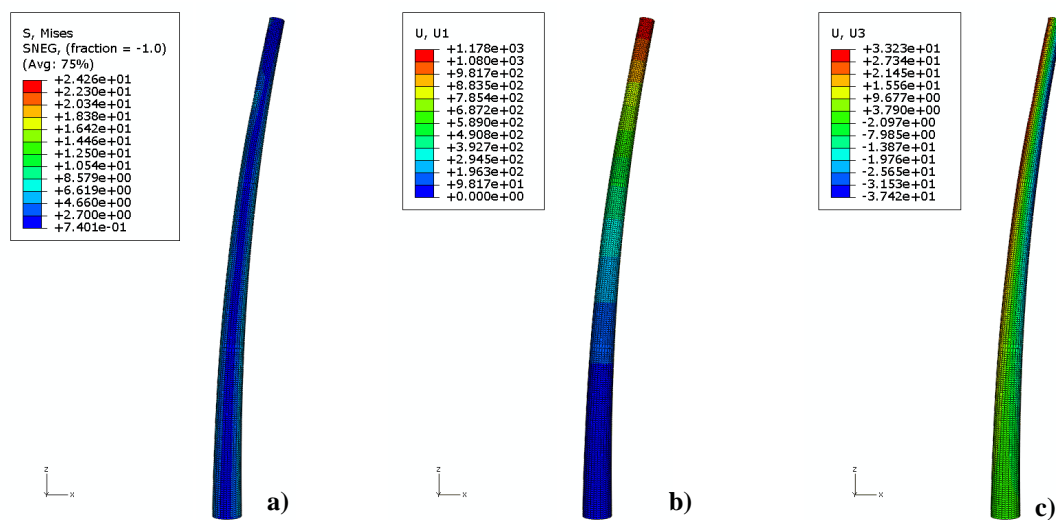


Figura 23 – Estrutura da torre 2. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c)

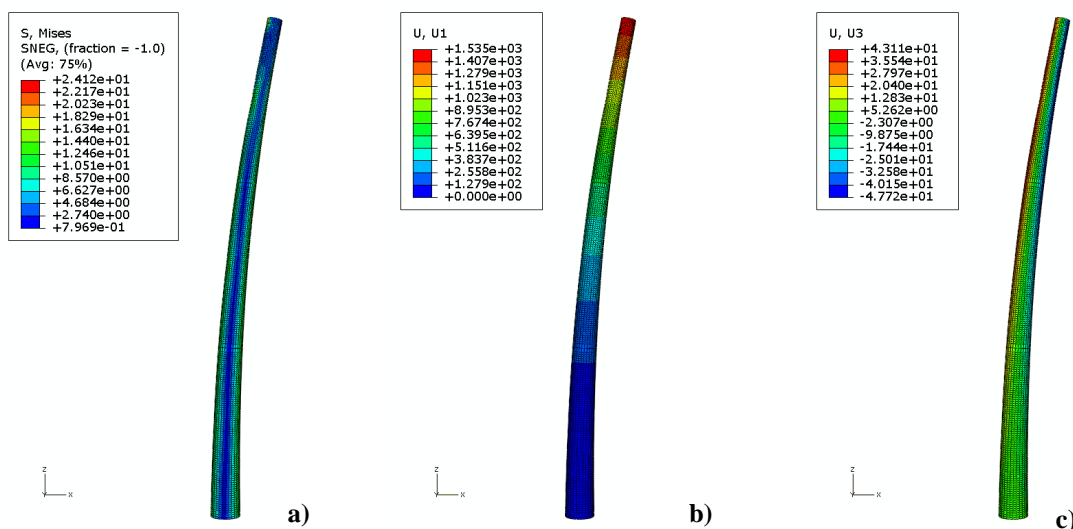


Figura 24 – Estrutura da torre 3. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).

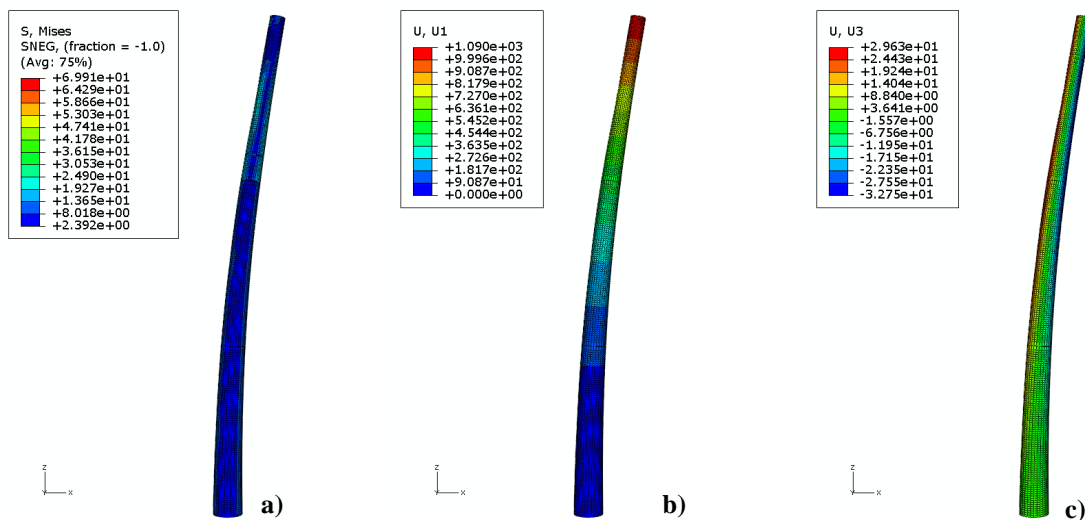


Figura 25 – Estrutura da torre 4. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).

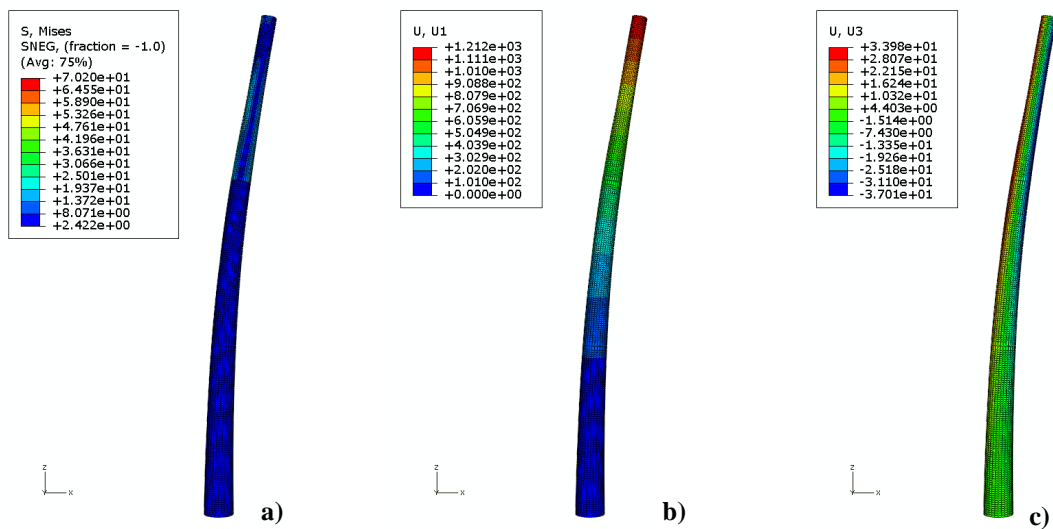


Figura 26 – Estrutura da torre 5. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).

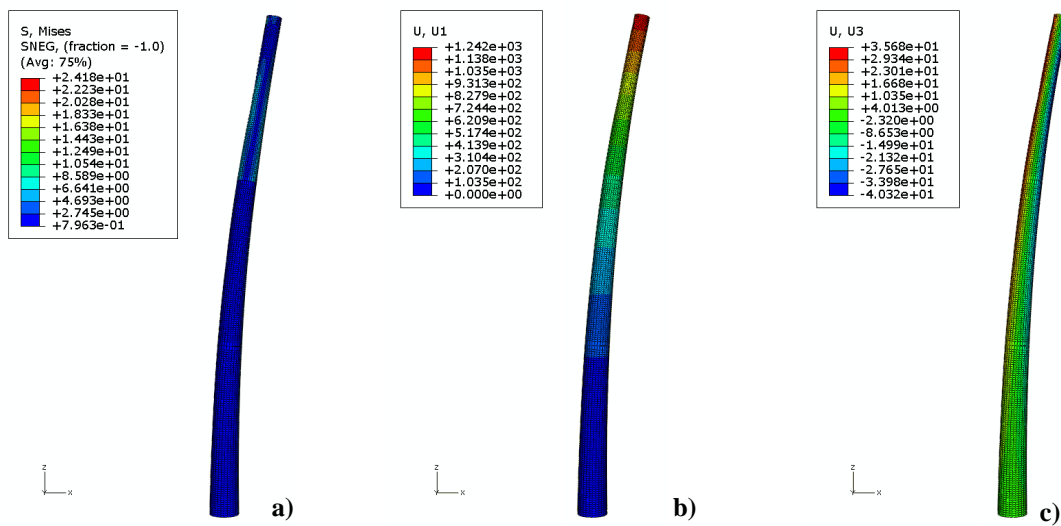


Figura 27 – Estrutura da torre 6. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).

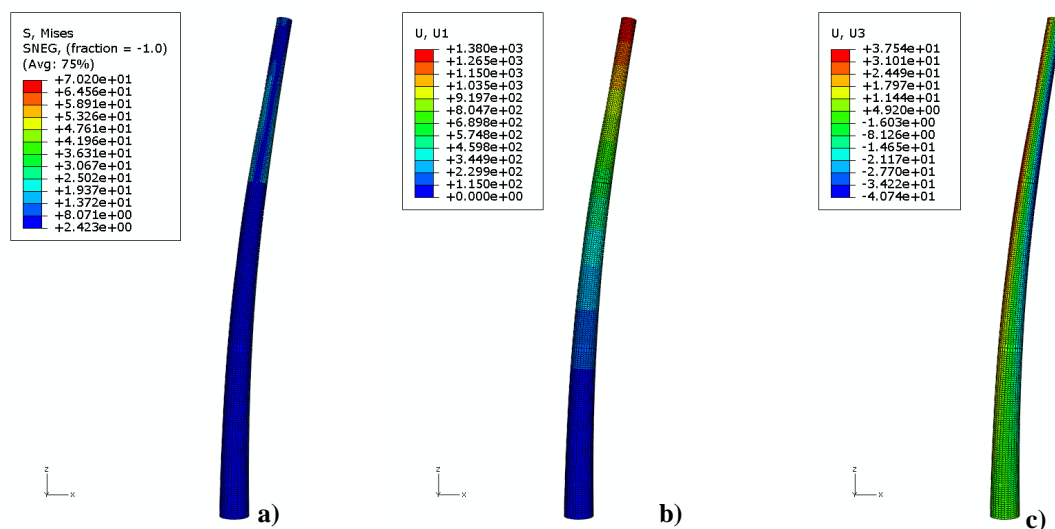


Figura 28 – Estrutura da torre 7. Tensões de Von-Mises (a). Deslocamentos segundo os eixos coordena x e z (b) e (c).

A tabela 8 inclui os valores máximos das tensões e deslocamentos observados nas figuras 22 a 28 para as diferentes estruturas. Apresentam-se também os coeficientes de segurança respectivos. Estes foram determinados através da aplicação da equação 14:

$$Cs = \frac{\sigma_y}{\sigma_{eq}} \quad eq.14$$

Tabela 8 - Valores de variáveis de projecto para as diferentes estruturas estudadas

Estrutura da torre	Tensão de Von-Mises (MPa)	Deslocamento em x (m)	Deslocamento em z(m)	Coeficiente de segurança
1	125	0.91	0.024	2.1
2	24.26	1.17	0.032	2.5
3	24.12	1.53	0.041	2.4
4	22.97	1.09	0.0296	2.6
	69.91			3.7
5	22.87	1.212	0.039	2.6
	23.29			2.5
	70.20			3.7
6	23.85	1.242	0.035	2.5
	23.27			2.5
7	23.14	1.38	0.754	2.5
	70.20			3.7

Os resultados apresentados na tabela 8 foram obtidos para as configurações geométricas das estruturas optimizadas que se encontram representadas na figura 21.

Alguns autores referem que o valor mínimo para o coeficiente de segurança destas estruturas deve ser 1.5. Foi assumido nesta tese, que uma estrutura de torre eólica se consideraria optimizada para um coeficiente de segurança mínimo igual a 2.0. Como se pode verificar pela tabela 8 o processo de optimização das estruturas terminou para valores iguais ou um pouco superiores a 2.0, excepto para o troço de aço tubular das estruturas 4, 5 e 7. Para o troço em aço destas estruturas, a espessura poderia ainda ter-se reduzido significativamente. Contudo, as espessuras nesse troços são significativamente menores que as espessuras dos troços correspondentes na estrutura totalmente em aço tubular.

Para melhor compreender o comportamento mecânico das estruturas aqui estudadas, foram elaborados gráficos da tensão em função da altura da estrutura, permitindo especialmente analisar em pormenor zonas críticas, nomeadamente o encastramento e a interface entre diferentes materiais. A análise destes gráficos permite também estudar com maior detalhe o efeito da inclusão das flanges no modelo de elementos finitos e consequentemente a sua influência na resposta mecânica das estruturas. Para facilitar esta análise, desenvolveu-se uma rotina que identifica os valores críticos ao longo da altura de cada uma das estruturas, gerando um ficheiro com a informação pretendida e que pode ser lido automaticamente por softwares comerciais adequados à elaboração de gráficos (*SigmaPlot*, por exemplo). Deste modo apresentam-se os gráficos que permitem comparar as respostas mecânicas em termos de tensão de Von-Mises em função da altura, para as estruturas 1 e 5 com e sem flange. Estes gráficos apresentam-se nas figuras 29 a 33.

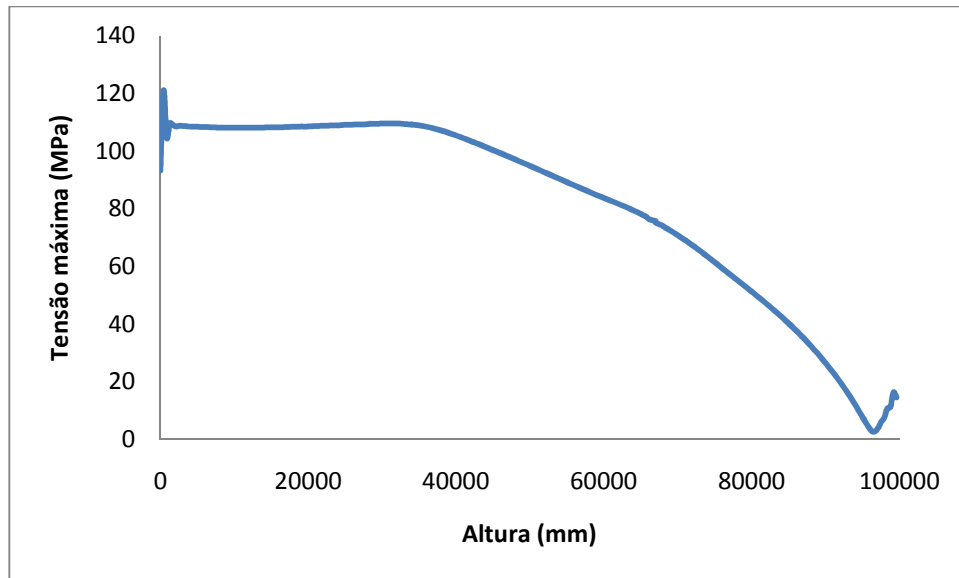


Figura 29 – Tensão de Von-Mises em função da altura para a estrutura em aço st 37.

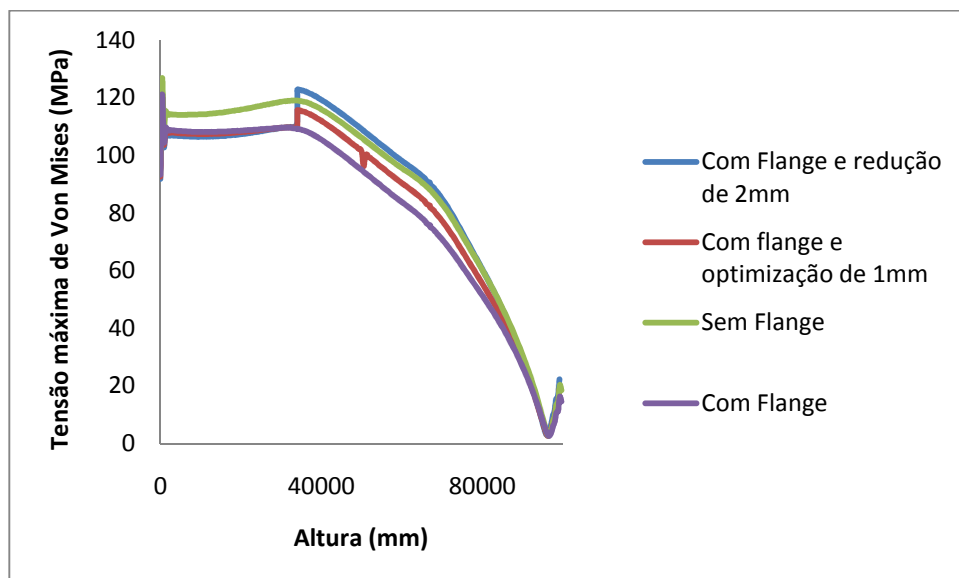


Figura 30 – Tensão máxima de Von-Mises em função da altura para a estrutura em aço st 37.

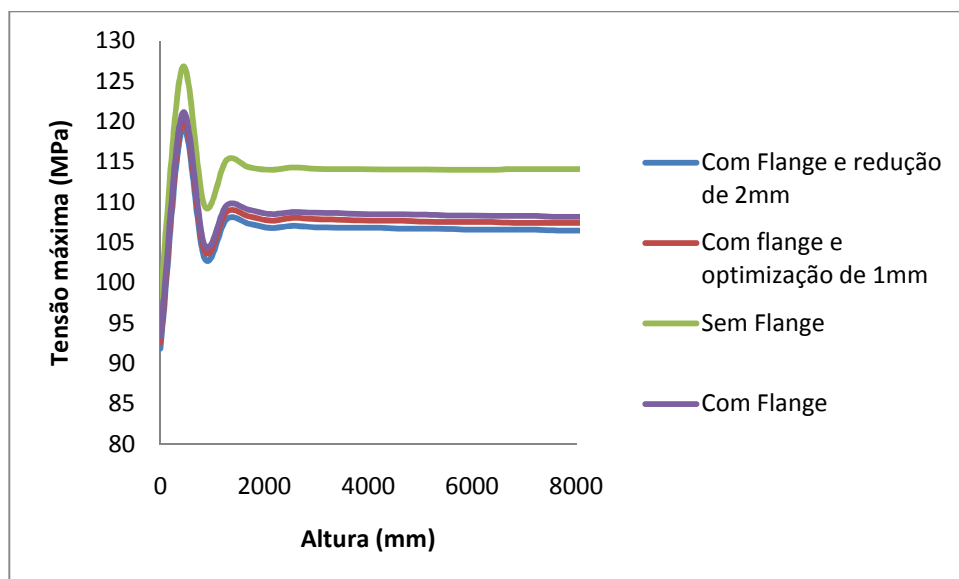


Figura 31 – Pormenor da tensão de Von-Mises em função da altura para a estrutura em aço st 37, no encastramento.

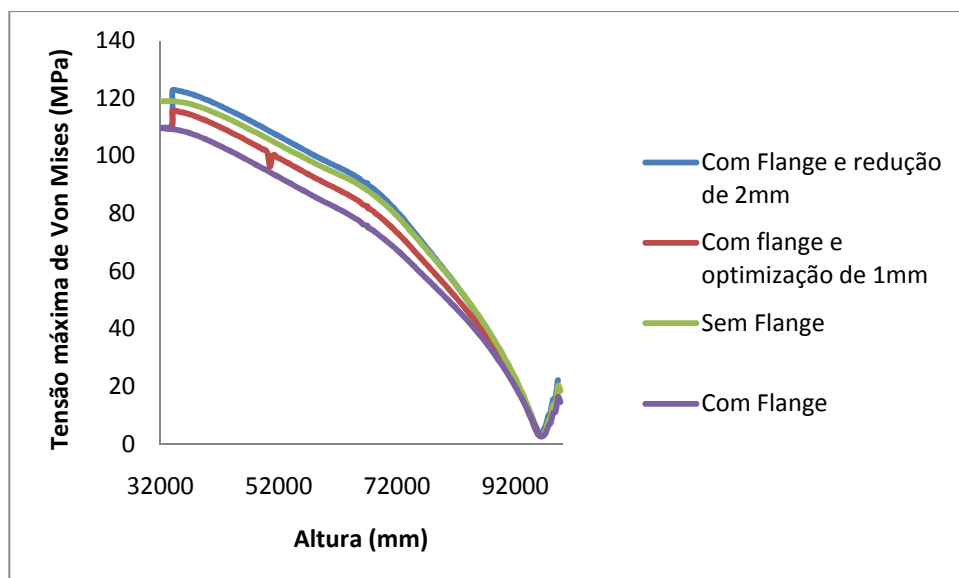


Figura 32 – Pormenor da tensão de Von-Mises em função da altura para a estrutura em aço st 37, na zona de redução de espessura.

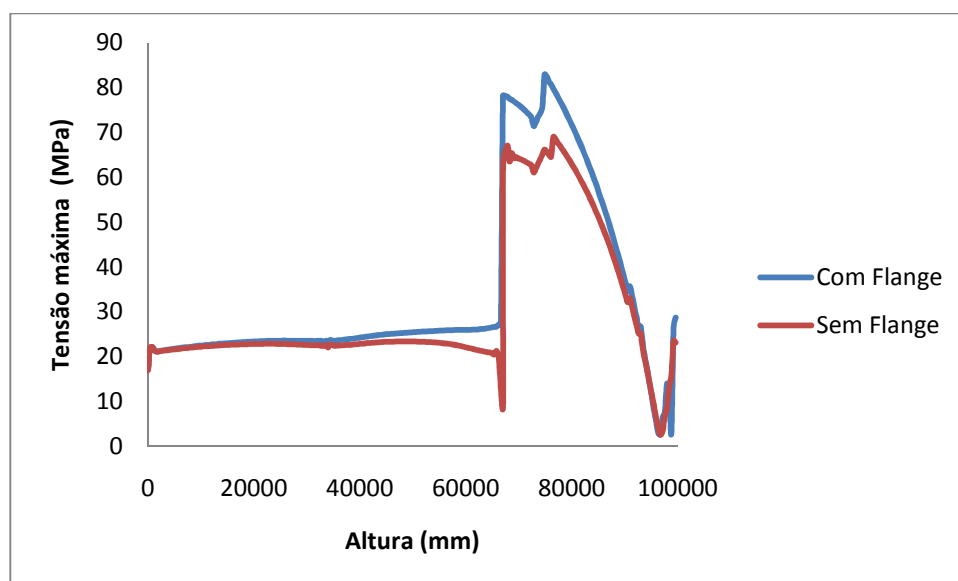


Figura 33 – Tensão de Von-Mises em função da altura para a estrutura híbrida betão/betão polimérico/aço.

A título exemplificativo da influência da flange no comportamento mecânico das estruturas, estudou-se uma estrutura totalmente construída em aço e uma estrutura híbrida formada por betão, betão polimérico e aço.

Por observação das figuras 29 a 32 verifica-se que a inclusão da flange no modelo numérico confere uma maior resistência mecânica à estrutura baixando o seu nível máximo de tensões de Von-Mises. Isto permitiu efectuar reduções de espessura até dois milímetros no segundo e terceiro troços da estrutura, mantendo a tensão máxima de Von-Mises no encastramento, isto é, mantendo o mesmo valor do coeficiente de segurança para a zona crítica.

Por observação da figura 33 verifica-se que a inclusão da flange no modelo confere, à semelhança do caso anterior, uma maior resistência mecânica à estrutura, baixando o seu nível de tensões máxima de Von-Mises de 13MPa (81 para 68MPa).

A figura 34 apresenta as curvas das tensões de Von-Mises máximas em função da altura para os sete casos de estruturas de torres eólicas estudadas. Estas curvas são representadas com mais pormenor pela figura 35. Os gráficos destas figuras permitem observar com pormenor o comportamento mecânico em termos de tensão máxima de Von-Mises de cada uma das estruturas e verificar qual o troço crítico em cada uma delas, para assim actuar sobre a sua geometria, diâmetros, espessuras, alturas e/ou materiais.

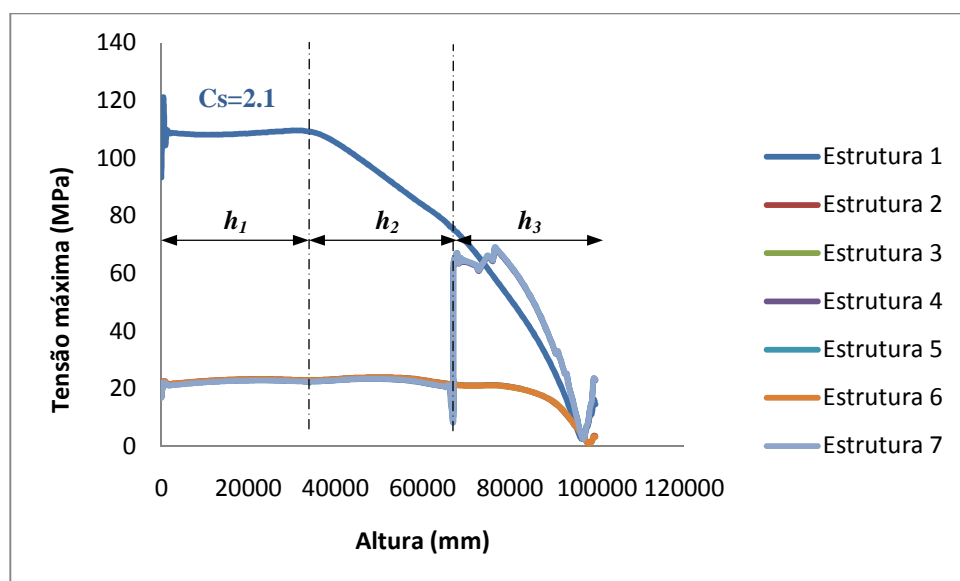


Figura 34 - Tensão de Von-Mises em função da altura para os sete casos de estudo

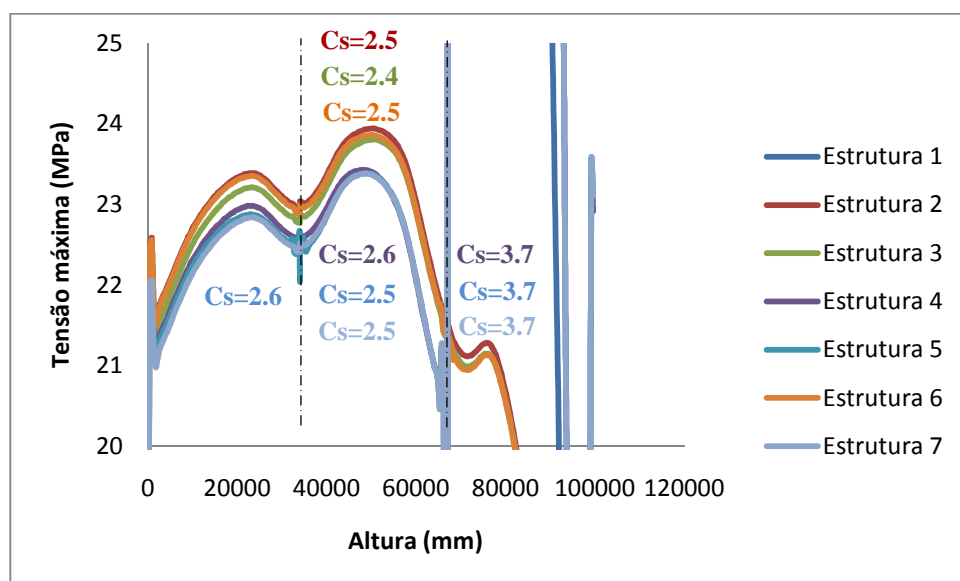


Figura 35 - Pormenor das curvas de tensão de Von-Mises em função da altura e respectivos coeficientes de segurança para os sete casos de estudo

Após os estudos anteriormente efectuadas é necessário realizar uma análise de estabilidade. Esta é de extrema importância quando se projectam estruturas de grandes dimensões. As estruturas de torres eólicas aqui estudadas têm uma elevada altura quando comparada com o diâmetro da secção, devendo portanto ser verificadas à estabilidade. Os trabalhos realizados pelos autores dos estudos da bibliografia reportam este problema para estruturas de torres eólicas de menores alturas.

Neste sentido, apresentam-se na tabela 9 os valores da carga crítica calculados a partir dos valores da área e o segundo momento de área para cada tipo de estrutura, de acordo com a metodologia apresentada na secção 5.5

Tabela 9 – Cálculo da carga crítica para cada estrutura

Estrutura da torre	Segundo momento de área (mm ⁴)	Carga crítica (kN)
1	1,5002E+11	7495.5
2	2,77228E+11	3800
3	2,77228E+11	3173
4	I ₁ =5,91264E+12	6926
	I ₂ =94348251395	
5	I ₁ =5,91264E+12 I ₂ =4,0593E+12 I ₃ =94348251395	6412
6	I ₁ =5,91264E+12 I ₂ =2,77228E+11	3553
7	I ₁ =5,91264E+12 I ₂ =1,31541E+11	2181.2

O valor da carga axial que cada uma das estruturas suporta no topo é de 950kN, sendo esta correspondente ao conjunto gerador, cabine e pás. Pelos resultados obtidos pode-se verificar que cada uma das torres apresenta uma carga crítica muito superior, estando portanto dentro dos valores perfeitamente admissíveis.

6.3.2 Análise dinâmica

A análise dinâmica consiste na determinação das características de vibração das estruturas estudadas nesta tese, nomeadamente na determinação das frequências naturais e modos de vibração. Este cálculo foi efectuado através do modelo de elementos finitos descrito na secção 5.6. Neste estudo foi considerada a massa para cada uma das estruturas assim como uma massa de 96940 kg relativa ao gerador eólico utilizados.

Os resultados obtidos para os modos de vibração e frequências próprias são apresentados nas figuras 36 a 41 e na tabela 10, respectivamente. Estes resultados foram obtidos para as estruturas optimizadas apresentadas na figura 14 da secção 6.1.

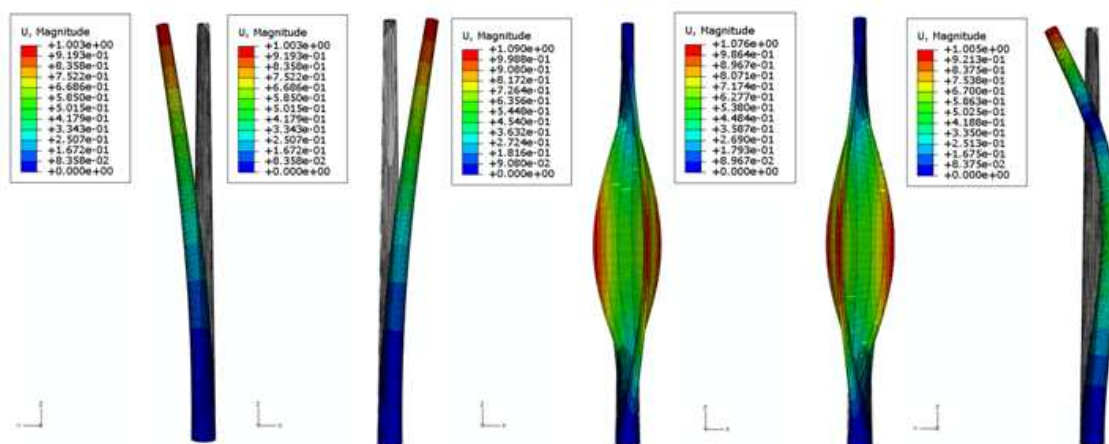


Figura 36 – Estrutura da torre 1. Modos de vibração e sua amplitude.

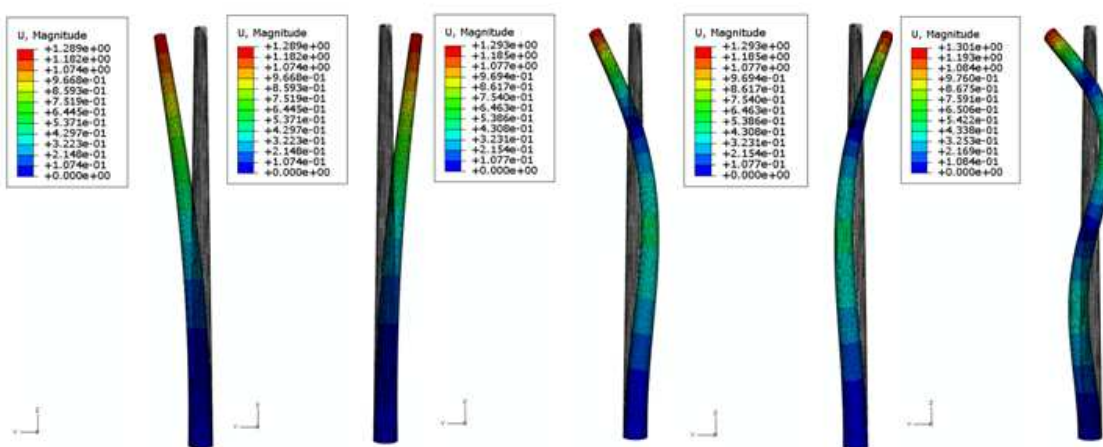


Figura 37 – Estrutura da torre 2. Modos de vibração e sua amplitude.

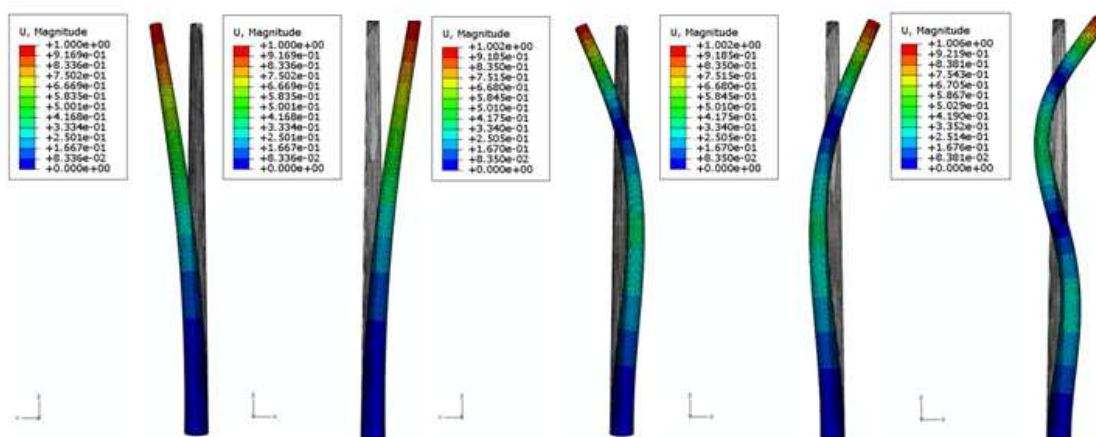


Figura 38 – Estrutura da torre 3. Modos de vibração e sua amplitude.

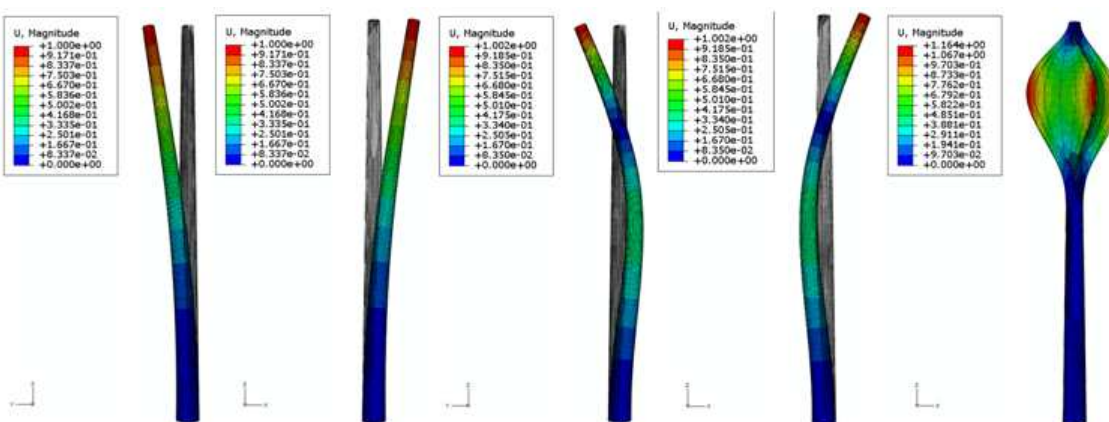


Figura 39 – Estrutura da torre 4. Modos de vibração e sua amplitude.

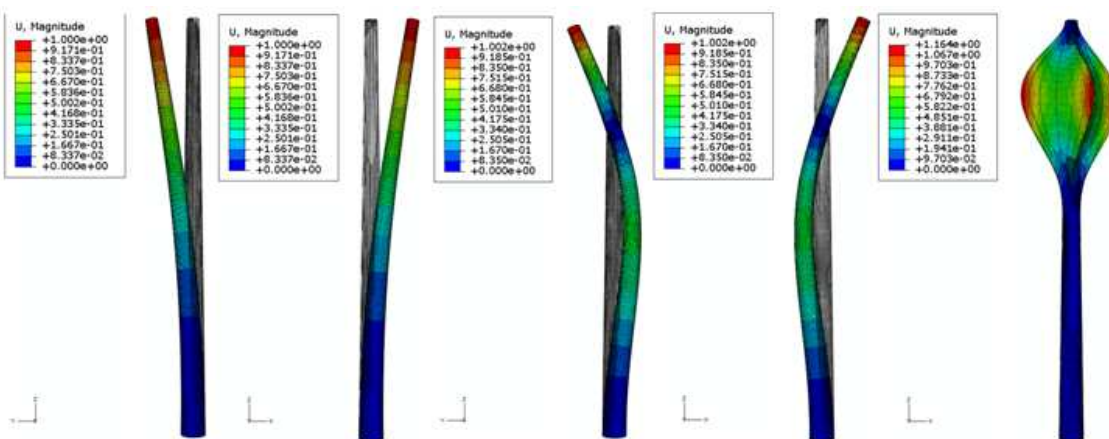


Figura 40 – Estrutura da torre 5. Modos de vibração e sua amplitude.

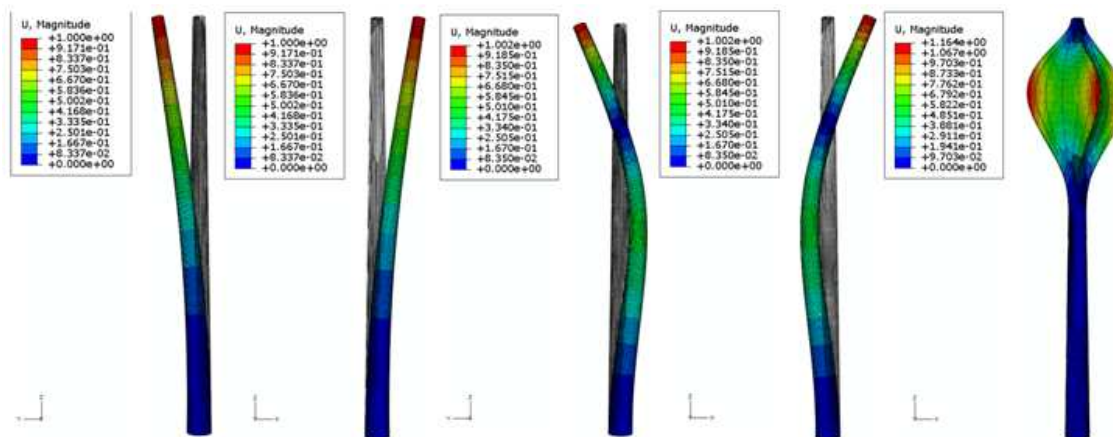


Figura 41 – Estrutura da torre 6. Modos de vibração e sua amplitude.

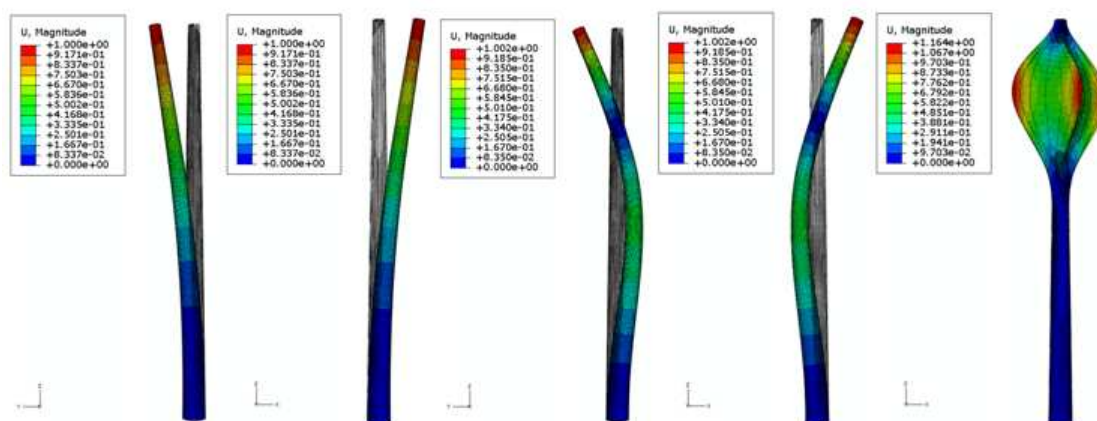


Figura 42 – Estrutura da torre 7. Modos de vibração e sua amplitude.

Os valores para as primeiras três frequências próprias estão representados na tabela 10. As frequências de vibração obtidas as sete estruturas aqui estudadas diferem substancialmente da frequência do rotor (0.37 Hz) do gerador eólico [5] assumido para os estudos realizados nesta tese.

Tabela 10 – Frequências de vibração

Estrutura da torre	Freq. 1 (Hz)	Freq. 2(Hz)	Freq. 3 (Hz)
1	0.68627	2.5368	3.0728
2	0.70540	2.5882	5.9775
3	0.67924	2.4920	5.7547
4	0.53375	2.5583	6.0655
5	0.51555	2.5055	5.9430
6	0.67924	2.4920	5.9832
7	0.51551	2.5055	5.9430

7. Conclusões e trabalhos futuros

Este capítulo apresenta uma visão global da tese. Efectua-se uma descrição sumária do trabalho de investigação desenvolvido e apresentam-se as principais conclusões. São também apontadas algumas direcções para trabalhos futuros.

7.1 Resumo e conclusões

Para a produção de energia eléctrica através dum recurso natural como o vento, são actualmente utilizados vários tipos de estruturas de torres eólicas, fundamentalmente estruturas construídas em aço tubular, treliça ou betão.

Uma das principais vantagens da estrutura em aço tubular é requerer normalmente pouca montagem em obra quando comparada com a estrutura em treliça. Todavia, como o seu transporte é efectuado por camiões, essas estruturas estão limitadas a 4.4m de diâmetro da base, sendo que para dimensões superiores é necessário um transporte especial ou então uma pré montagem na obra, elevando assim os seus custos. Por outro lado, a estrutura em treliça apresenta como uma das principais vantagens a facilidade de transporte, requerendo contudo, elevados custos de montagem e manutenção devido ao grande número de diferentes elementos estruturais usadas na sua construção. Adicionalmente, ambas as estruturas apresentam como desvantagem comum, problemas de corrosão. Mais recentemente, tem-se evoluído para a construção de estruturas em betão quando são necessárias alturas superiores a 85m. Esta têm como uma das principais vantagens a possibilidade de ser construída no local de implantação, apresentando estabilidade superior quando comparada com a estrutura em aço da mesma altura. Para estas aplicações a estrutura em aço tubular pode torna-se muito instável.

O comportamento mecânico destas estruturas tem vindo a ser estudado através de várias abordagens que têm por base o método dos elementos finitos e os procedimentos do Eurocode 1 e Eurocode 3. Apesar de terem sido desenvolvidos alguns modelos de elementos finitos para realizar o estudo referido, estes apresentam importantes limitações:

- a sua aplicação está restringida apenas ao estudo de um tipo de material. Foram estudadas apenas estruturas totalmente construídas em aço tubular ou betão;
- o comportamento mecânico destas estruturas tem vindo a ser analisado por outros autores através da aplicação de modelos de elementos finitos incorporam apenas elementos casca;
- os modelos de elementos finitos descritos pela bibliografia não parametrizam os principais parâmetros de projecto;

Através deste trabalho de investigação desenvolveu-se uma metodologia, baseada na aplicação do método dos elementos finitos, que permite estudar o comportamento mecânico de estruturas de torres eólicas em termos estáticos e dinâmicos, permitindo também usar vários tipos de materiais em simultâneo, sendo essencialmente constituída por:

- rotina que determina de forma semi-automática as solicitações sobre uma estrutura, diminuindo consideravelmente o *input* humano;
- rotina que efectua o pré-processamento numérico envolvendo a geração de geometrias apropriadas de forma parametrizada, os tipos de elementos finitos utilizados e respectivas malhas, envolvendo dois tipos de elementos finitos (elemento casca para a estrutura e elemento sólido para as flanges). Atribui também as propriedades mecânicas dos vários materiais assim como as condições de fronteira apropriadas e solicitações a que a estrutura está submetida. A rotina gera os ficheiros necessários para o cálculo estático e dinâmico (modos e frequências de vibração), efectuados através da utilização do ABAQUS.

Para validar a metodologia, o modelo aqui desenvolvido foi sujeito às mesmas condições que o modelo desenvolvido por Uys [6], sendo que os resultados obtidos são similares, quer em análise estática quer em dinâmica.

A inclusão do elemento sólido, apropriado para modelar a flange, no modelo de elementos finitos, possibilitou obter uma resposta mecânica mais próxima do comportamento real de uma estrutura de torre eólica,

permitindo assim otimizar a estrutura por via de uma redução superior de espessura, quando comparado com o modelo sem flange.

A metodologia aqui desenvolvida foi aplicada a sete casos de estudo, tendo como objectivo a obtenção de estruturas de torres eólicas que apresentem uma melhor resposta mecânica em termos estáticos e dinâmicos e também uma optimização em termos do seu peso próprio obtida pela combinação de diferentes materiais e/ou redução de espessuras. Neste contexto, foram realizados estudos comparativos sobre estruturas formadas apenas por um único material, aço ou betão ou betão polimérico e por vários materiais, betão/aço, betão polimérico/aço, betão/betão polimérico e betão/betão polimérico/aço. Os estudos realizados permitem concluir que, para além das estruturas construídas em materiais convencionais (aço e betão), é tecnicamente viável a construção destas estruturas em materiais mais avançados como por exemplo o betão polimérico. Refira-se também que as estruturas em betão e/ou betão polimérico não apresentam limitações logísticas associadas ao transporte e acessibilidades, tendo também menores pesos próprios que as de aço tubular. O betão polimérico apresenta ainda a vantagem de não estar sujeito à corrosão.

O modelo proposto constitui assim uma melhoria significativa em termos de análise e optimização de estruturas em relação às abordagens existentes.

7.2 Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros de investigação incluem os seguintes tópicos:

- actualmente, o modelo proposto não inclui as solicitações sísmicas. A inclusão destas solicitações permitirá alargar o espectro de aplicações da metodologia aqui desenvolvida a zonas com actividade sísmica relevante;
- a solicitação do vento e do gerador eólico provoca fadiga na estrutura. Este efeito foi aqui considerado de acordo com o procedimento do Eurocode 1, o qual majora a solicitação estática para prevenir este efeito. Deve-se portanto incluir no modelo esta solicitação dinâmica para se obter ainda um maior rigor em termos de resposta mecânica da estrutura;

- o desenvolvimento deste modelo através da inclusão do elemento finito casca de 8 nós para modelar a estrutura, assim como a inclusão do elemento finito sólido de 20 nós para modelar a flange, permitirá analisar a influências dos elementos finitos utilizados no comportamento da estrutura.
- ao nível dos materiais, podem ser conduzidos estudos para obter as curvas características dos mesmos por duas vias: a primeira passa pela realização de testes experimentais em betão polimérico com diferentes composições da usada neste trabalho, enquanto que a segunda via passa pela realização de estudos sobre a inclusão de resíduos de materiais termoendurecíveis como reforço, tendo um impacto ambiental positivo.
- modelar a interacção solo-fundação para aplicação da metodologia a estruturas de torres eólicas a implantar em solos “macios”.
- incluir na metodologia um módulo de orçamentação para estruturas de torres eólicas, permitindo assim seleccionar a estrutura que apresenta um comportamento mecânico adequado e simultaneamente o menor custo.

Bibliografia

- [1] Zervos A, Steve S. *Global wind 2007 report*, GWEC – Global Wind Energy Council, Segunda Edição, 2008
- [2] Zervos A, Teske S, Sawyer, S. *Global Wind Energy Outlook*, GWEC – Global Wind Energy Council, 2008
- [3] A Energia Eólica em Portugal, REN, 2008
- [4] Bazeos N, Hatizigeorgiou GD, Hondros ID, Karamaneas H, Karabalis DL, Besos DE. *Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower*. Engineering Structures, 24, 1015-25, 2002
- [5] Lavassas I, Nikolaidis G, Zervas P, Efthimiou E, Doudoumis IN, Baniotopous CC. *Analysis and design of the prototype of a steel 1 – MW wind turbine tower*. Engineering Structures, 25, 1097-106, 2003
- [6] Uys P, J Farkas, K. Járarnai, Von Tonder F. *Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure*, Engineering Structures, 29, 1337–1342, 2007
- [7] Reinhard H, Gideon P, Van Z. *Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, 1079-1096, 2007
- [8] Eurocode 1: Part 2-4. *Wind loads*. ENV 1991-2-4, 1999
- [9] Simões T. *Caracterização do Escoamento Atmosférico e Locais com Elevado Potencial Eólico*. Relatório de Estágio de Licenciatura, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1999
- [10] Moura R, Palma J, Santos C. *Simulação computacional de escoamentos atmosféricos sobre regiões montanhosas através de aplicação comercial – FLUENT*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, 2009
- [11] Hiester, T, Pennell W. *The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems*. Windbooks, New York, USA, 1983
- [12] Eurocode 3: *Design of a steel structure part 1-1*, PrEN 1993-9, 2002
- [13] Basar Y., Montag U., Ding Y. *On an isoparametric finite element for composite laminates with finite rotations*. Comp. Mech. 12, 329–348, 1993

- [14] Tricklebank A, Halberstadt, P, Magee B.J., Bromage A.; *Concrete Towers for Onshore and Offshore Wind Farms*. The concrete Centre, 2007
- [15] Ferreira, A. *Introdução aos betões e argamassas poliméricas*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001
- [16] Barlos, J. *Materiais compósitos no reforço de estruturas*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 2009
- [17] Tomás S, Iñigo V, Antonio F. *Reinforced polymer concrete: Physical properties of the matrix and static/dynamic bond behavior*, Cement & Concrete composites, 27,934-944, 2005
- [18] Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Porto Editora, 2010
- [19] Abaqus, *Analysis User Manual*, Volume IV, Dassault Systems, 2008
- [20] Rizzo A R, *Estimating Errors in FE Analyses*, Mechanical Engineering – CIME – Computers in Mechanical Engineering, 113(5), 61 – 63, 1991
- [21] Metin H, Selim P. *Investigation so stress-strain models for confined high strength concrete*, Karadeniz Technical University, Department of Civil Engineering, Turkey, 2006